



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie

Modelování odtoku ze segmentů zelených střech

Diplomová práce

Modeling of runoff from green roof test beds

Diploma Thesis

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Dohnal, Ph.D.

Vojtěch Skala

Praha 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Skala

Jméno: Vojtěch

Osobní číslo: 410722

Zadávací katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování odtoku ze segmentů zelených střech

Název diplomové práce anglicky: Modeling of runoff from green roof test beds

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte možnosti modelování epizodického odtoku ze segmentů zelených střech umístěných na střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. Použijte a optimalizujte jednoduché modely na bázi kaskády lineárních rezervoárů, tak, aby odezva modelů co nejlépe odpovídala měřeným odtokům. Alternativně hledejte optimální sady parametrů pro jednotlivé epizody a celé sezóny. Diskutujte časové změny parametrů epizod s ohledem na vegetační pokryv a charakter hydrologického roku. Proveďte základní citlivostní analýzu použitých modelů.

Seznam doporučené literatury:

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. New York: McGraw-Hill.

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Dohnal, PhD.

Datum zadání diplomové práce: 4. 10. 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 7. 1. 2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

6. 10. 2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Jednou z možností ochrany urbanizovaných území před nepříznivými antropogenními vlivy je plošné budování zelených střech. Mezi jejich hlavní funkce patří transformace odtoku dešťové vody. Řada studií se zabývala průběhem transformace odtoku v zelených střechách a možnostmi její předpovědi. Sestavené prediktivní modely lze následně využít při dimenzování odtokových systémů nebo jako vstup modelů urbánního mikroklimatu. Pro výpočet odtoku ze zelených střech během srážko-odtokových epizod byly vybrány dva jednoduché deterministické modely. Oba byly kalibrovány s různými počátečními sadami parametrů a verifikovány pomocí dat ze dvou testovacích segmentů zelených střech, sestavených na střeše budovy UCEEB v Buštěhradu. Použitá data představují nepřerušenu řadu měření srážkové a odtokové výšky z let 2014 až 2017. Analyzována byla závislost výsledku modelování na volbě počátečního odhadu a časové změny modelových parametrů. Alternativně byly nalezeny efektivní parametry pro zkoumané sezóny. Dvouparametrický model na bázi nelineárního rezervoáru prokázal schopnost úspěšně počítat odtok během epizod s odtokovým koeficientem větším než 0,35. Model na principu okamžitého jednotkového hydrogramu vykazoval obecně horší výsledky a nelze ho bez dalšího zkoumání k predikci odtoku ze zelených střech doporučit.

klíčová slova: zelené střechy, nelineární rezervoár, okamžitý jednotkový hydrogram, rozchodníky, zadržování srážkové vody, testovací segmenty

Abstract

The new attractive alternative of protecting urbanized areas from unfavorable anthropogenic impacts is the constructing of green roofs. Their main functions include the transformation of rainwater outflow. A number of studies have dealt with the outflow transformation of the green roof and the possibility of its prediction. Subsequently, calibrated hydrological models can be used to design drainage systems or contribute as an input of urban microclimate models. Two simple deterministic models were selected to calculate the outflow from green roofs during rainfall-runoff episodes. Both models were calibrated with different initial parameter sets and verified using data from two green roof test beds established on the roof of the UCEEB in Buštěhrad. The data used cover continuous series of rainfall and runoff measurements from 2014 to 2017. The influence of the initial estimate of parameters and the temporal change of the model parameters on the modeling result was analyzed. Alternatively, effective parameters were found for the vegetation seasons under study. A two-parameter non-linear reservoir model has demonstrated the ability to reliably predict runoff during episodes with a runoff coefficient greater than 0.35. Instantaneous unit hydrograph model has shown generally worse results and cannot be recommended for predicting outflow from the green roofs without further investigation.

keywords: green roofs, simple storage routing model, instantaneous unit hydrograph, stonecrops, storm water detention, test beds

Čestné prohlášení

Na svou čest prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce doc. Ing. Michala Dohnala, Ph.D. Dále prohlašuji, že jsem použil pouze podklady uvedené v seznamu literatury.

Souhlasím s užitím tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7. 1. 2018

Vojtěch Skala

Poděkování

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Michalovi Dohnalovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné rady a detailní připomínky k práci.

Při zpracování diplomové práce bylo využito měření a poznatků získaných v rámci projektů Grantové agentury České republiky 14-10455P a 17-21011S.

Obsah

1. Úvod	8
1.1. Motivace práce	8
1.2. Cíl a struktura práce	8
2. Rešerše literatury	9
2.1. Kontinuální a epizodické modelování odtoku	10
2.2. HYDRUS-1D.....	11
2.3. SWMM LID-GR.....	12
3. Materiály a metody	13
3.1. Popis experimentu	13
3.2. Konstrukce segmentů zelených střech a jejich vybavení	13
3.3. Vyhodnocované epizody	14
3.4. Stanovení IDF křivek.....	16
3.5. Model na bázi nelineárního rezervoáru	16
3.6. Model na principu okamžitého jednotkového hydrogramu	17
3.7. Optimalizační proces a měření kvality modelu	18
3.8. Validací proces	20
4. Výsledky a diskuze	21
4.1. Odtokové charakteristiky segmentů zelených střech	21
Závislost odtokové a srážkové výšky	22
4.2. Porovnání s návrhovou srážkou.....	23
4.3. Scénář A – individuální optimalizace srážko-odtokových epizod	24
4.4. Scénář B – optimalizace souborů srážko-odtokových epizod.....	30
4.5. Scénář C – optimalizace souborů srážko-odtokových epizod.....	30
4.6. Citlivost optimalizačního procesu pro různé počáteční odhady	31
Scénář A.....	31
Scénář B.....	33
Scénář C	33
4.7. Citlivost parametrů použitých modelů.....	33
4.8. Validace modelu pro vybrané optimální parametrické sady	34
5. Závěr	36
6. Seznam použité literatury	38
7. Seznam obrázků	40
8. Seznam tabulek	42
9. Přílohy	44

1. Úvod

1.1. Motivace práce

Některé urbanizované oblasti jsou každoročně ohrožovány záplavami. Jiné tvoří tzv. tepelné ostrovy (místa s vyšší průměrnou teplotou, než by měly bez zástavby) a nejsou vhodným místem pro kvalitní a zdravý život obyvatel. Nejvhodnějším řešením výše zmiňovaných problémů je navrácení přírodního charakteru části ploch v těchto oblastech. Možností je vybudovat parky, zasakovací průlehy, přírodní retenční nádrže nebo zelené (vegetační) střechy. Všechny tyto způsoby ochrany spadají do kategorie *low-impact development* (zkráceně *LID*), což je soubor nástrojů a technik pro ochranu a regulaci vod ve stávajících či plánovaných městských lokalitách. Hlavním cílem je vodu infiltrovat, zadržet a evapotranspirací vrátit zpět do atmosféry v místě, kde napršela, přírodě blízkým způsobem.

Zelené střechy jsou populární hlavně proto, že využívají volné střešní prostory. Hydrologicky nejvýznamnější funkcí zelených střech je zadržování srážkové vody a její následné navrácení do přirozeného hydrologického oběhu. Část vody samozřejmě projde při větších srážkových událostech celým systémem a odtéká do kanalizace. Pro navrhování kanalizačních soustav, napojených na střešní odvodnění, je důležité znát schopnost zelených střech zadržovat srážkovou vodu a zpožďovat špičkový odtok. Motivací práce je bližší porozumění a následný pokus o matematické vyjádření těchto procesů pomocí modelování.

1.2. Cíl a struktura práce

Cíle práce jsou: (1) přizpůsobit dva jednoduché modely (jeden na bázi nelineárního rezervoáru a druhý na principu okamžitého jednotkového hydrogramu), pro modelování hydrologické reakce segmentů zelených střech, (2) nalézt a ověřit optimální sady parametrů pro oba modely a (3) porovnat modelované výsledky s měřeními a posoudit možnosti využití těchto modelů pro praxi.

První část diplomové práce obsahuje rešerši literatury na téma modelování odtoku ze zelených střech a s tím související problematiku.

Další kapitola přibližuje samotný experiment na střeše budovy Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB), technický popis segmentů zelených střech, dostupná data, ukazatele kvality shody vypočteného a měřeného odtoku a samotné modely. Dvouparametrický model na bázi nelineárního rezervoáru a rovněž dvouparametrický model na principu okamžitého jednotkového hydrogramu.

Následuje výsledková část, kde je popsán proces kalibrace modelů – hledání takových optimálních sad parametrů pro jednotlivé epizody a celé sezóny, pomocí kterých bylo dosaženo nejlepší shody odezvy modelů a měřeného odtoku. Kapitola obsahuje také validaci parametrů

modelů a diskusi časové změny parametrů s ohledem na vegetační pokryv a charakter hydrologického roku. Nakonec byla provedena základní citlivostní analýza použitých modelů.

Posledním oddílem je závěr s celkovým zhodnocením experimentu a dosažených výsledků.

2. Rešerše literatury

Jednou z nejdůležitějších výhod zelených střech, oproti střechám konvenčním, je snížení množství dešťové vody, která z nich odtéká o 21–81 % a posun špičkového odtoku v čase přibližně o 5–40 minut (například Morgan et al., 2013 a Locatelli et al., 2014). Mobilia et al. (2014) vypočítali, že v rámci urbanizované plochy (s 67% nepropustností a 16% střešní pokryvností) lze očekávat, po vybudování zelených střech, snížení dlouhodobého odtokového koeficientu až o 30 %. Zelené střechy také přispívají ke zlepšení lokálního mikroklimatu. Čistí antropogenně znečištěný vzduch a tvoří prostředí pro život některých živočichů. Dále pak chrání konstrukci střechy před vnějšími vlivy, tlumí hluk, lze je využívat k rekreaci nebo dokonce pěstování plodin. Funkce vegetačních střech jsou dány hlavně použitým substrátem a vegetací. Nejvýznamnějším vnějším vlivem, působícím na zelené střechy, jsou klimatické podmínky v dané lokalitě (Stovin et al., 2012). Z hlediska hydrologie se tedy vegetační střecha se stejnými vlastnostmi bude chovat různě, v klimaticky odlišných oblastech.

Podle využití plochy se dělí vegetační střechy na intenzivní a extenzivní. Intenzivní zelené střechy mají hlubší substrát a vyšší vegetaci (keře, stromky) a lze je aktivně využívat k rekreaci. Na extenzivních zelených střechách je nanesena nižší vrstva substrátu a drobná vegetace (trvalky, traviny, rozchodníky). Nelze je intenzivně využívat, současně ale nevyžadují náročnou údržbu a lze je budovat s větším sklonem.

Stanovení hydrologické reakce zelené střechy na srážkovou událost vyžaduje velmi kvalitní data a adekvátní simulační model. Některé modely jsou schopné počítat odtok kontinuálně během delších období, jiné jsou vhodné pouze pro výpočet odtoku během srážkových událostí. Nutné je také správně určit vlastnosti a vztahy všech částí systému. Typicky se jedná o vegetační vrstvu, substrát a drenážní vrstvu Vesuviano et al. (2014). Kromě simulačních modelů mohou být pro studium hydrologických reakcí zelených střech použity laboratorní experimenty.

K simulaci odtoku lze použít jednoduché deterministické modely nebo komplexní pedologicko-hydrologické modely (například *HYDRUS-1D* numericky řešící Richardsovu rovnici nebo *SWMM LID-GR*, popsané níže). Jednoduché deterministické modely mají menší požadavky na výpočetní techniku a lépe interpretovatelné parametry (Locatelli et al., 2014). Například Palla et al. (2012) porovnali schopnosti jednoduchého konceptuálního modelu a modelu *HYDRUS-1D*. Zjistili, že je komplexní hydrologický model přesnější. Jednoduchý konceptuální model byl méně přesný, stále ale použitelný pro návrh zelené střechy, zejména pokud je k dispozici málo informací.

2.1. Kontinuální a epizodické modelování odtoku

Kasmin et al. (2010), kteří se zabývali predikcí odtoku ze zelených střech během delšího období, upozorňují na zásadní roli evapotranspirace ve výpočtech. Pro výpočet odtoku ze segmentu zelené střechy v Sheffieldu (plocha 3 m²; hloubka substrátu 80 mm; sklon 1,5°) sestavili jednoduchý dvouparametrický nelineární model (popsaný v kapitole 3.5.). Jejich předpokladem bylo, že se substrát během srážkové události sytí, dokud nedosáhne polní vodní kapacity, pak se začne vytvářet dočasná zásoba vody a objeví se odtok. Dočasná zásoba voda je vyprázdněna do dvou hodin po konci srážkové události. Mezi srážkovými událostmi je retenční kapacita obnovována evapotranspirací. Evapotranspiraci se pokusili odhadnout odvozením z délky bezdeštného období, kalibrací koeficientu evapotranspirace, Thornthwaitovi rovnice a laboratorními měřeními. Ke kalibraci modelu použili měření z let 2007 až 2009. Zjistili, že na zkoumané lokalitě je po většinu roku evapotranspirace menší než 1 mm/den a retenční kapacita segmentu může být obnovena za 9 dní v létě až 47 dní v zimě. Za nejvhodnější metodu výpočtu evapotranspirace označili Thornthwaitovu rovnici, která je dostatečně přesná a vyžaduje pouze měření teploty.

Řada studií se zabývala modelováním odtoku pouze během srážkových událostí (například Hakimdavar et al., 2014 a Palla et al., 2012). Důležité je v tomto případě posouzení vhodnosti jednotlivých srážkových epizod pro modelování odtoku ze zelených střech. Možností je vynechat menší srážkové události (například < 5 mm) vyvolávající malý odtok, vzhledem k jejich problematickému modelování a jejich nízkému hydrologickému významu. Další použitelná kritéria stanovili například Carson et al. (2013), pro případ, že je odtok měřen během epizod měrným přelivem. Epizody by podle nich neměly být použity pro modelování odtoku pokud (1) příliš vysoká intenzita odtoku způsobí zahlcení přelivu, (2) byla srážka ve formě sněhu, (3) objem odtoku přesáhl objem srážky, což se může stát v případě ucpání přelivu listím a štěrkem, nebo (4) bouře způsobí poruchu záznamového zařízení. Pro zefektivnění výpočtu epizodického odtoku lze do simulačního modelu zahrnout počáteční vlhkostní stav zelené střechy (Krebs et al., 2016).

Vesuviano et al. (2014) použili pro výpočet odtoku stejné rovnice jako Kasmin et al. (2010), střešní systém ovšem rozdělili na dva rezervoáry (substrát a drenážní vrstvu). Vytvořili tak čtyřparametrický nelineární model. Příčinné srážky generovali simulátorem deště nad segmentem zelené střechy s plochou 1x5 m². Model dosáhl velmi dobré shody ($R^2 > 0,95$) simulovaného odtoku s měřeným odtokem, zapříčiněným jak srážkami s konstantní intenzitou (0,3; 0,6 a 1,2 mm/min), tak s proměnnou intenzitou (1letých až 100letých návrhových srážek). Parametry pro drenážní vrstvu je podle nich možné použít u drenážních vrstev podobného typu. Parametry pro substrát je ale třeba optimalizovat individuálně, vzhledem k důležitosti rezervoáru, tvořeného substrátem, a možné rozdílnost u sledovaných zelených střech. Rozdíly při použití nelineárního modelu s jedním nebo dvěma rezervoáry nebyly diskutovány.

Locatelli et al. (2014) převzali deterministický model od Zimmera a Geigera (1997), vhodný k návrhu vícevrstvých infiltračních systémů a ověřili jeho schopnost modelovat odtok ze segmentů zelených střech. Odtok modelovali kontinuálně i epizodicky. Model kalibrovali pomocí měření ze tří

segmentů (s plochou 9 m², 20 m² a 20 m²), umístěných v Dánsku. Kromě podpovrchové a retenční (dočasné) zásoby model uvažuje také povrchové zásoby, tvořené intercepcí vegetace. Povrchová zásoba je obnovována evapotranspirací. Po vyčerpání povrchové zásoby odtéká voda do podpovrchové nádrže (substrát a drenážní vrstva) a následně do dočasné zásoby. Odtok z dočasné zásoby popisují Locatelli et al. (2014) metodou nelineárního rezervoáru, podobně jako Kasmin et al. (2010). K výpočtu evapotranspirace použili Penmanovu-Monteithovu rovnici. K modelování odtoku z jednoho segmentu použili pro porovnání komerční program MIKE URBAN. Jejich výsledky ukázaly, že jsou oba modely schopny epizodicky simulovat odtok ze segmentů. Simulací odtoku během epizod z 22letého období zjistili, že se zpoždění odtoku, redukce kulminačního odtoku a redukce objemu odtoku snižuje se zvyšující se dobou opakování epizod. Při kontinuální simulaci se modely chovají velmi podobně. Použitý jednoduchý deterministický model je podle nich vhodný pro integraci do modelů urbánního mikroklimatu.

2.2. HYDRUS-1D

Další skupinou, která se pokusila modelovat odtok ze zelené střechy, jsou Yang et al. (2015). Použili lineární model, založený na srážko-odtokovém vztahu, získaném z měřených dat (srážko-odtokový vztah se zahrnutou počáteční vlhkostí byl sestaven také pro tuto práci, viz kapitola 4.1). Kromě toho se zaměřili pomocí programu *HYDRUS-1D* na způsob, jakým je odtok tvořen. První možností je, že se odtok objevuje potom, co je substrát zelené střechy plně nasycen (*saturation-excess*). Ve druhém případě se odtok objevuje, když je intenzita srážky větší než infiltrační schopnost substrátu (*infiltration-excess*). K dispozici měli měření odtoku, srážek a vlhkosti substrátu z roku 2012 na zelené střeše v Pekingu, osázené rozchodníky *Sedum lineare*, o ploše 120 m², se sklonem 3°. Došli k závěru, že je odtok ze sledované střechy tvořen oběma způsoby. *Saturation-excess* ovšem přispíval k celkovému odtoku výrazněji a je proto důležitější než *infiltration-excess*, jehož vliv se se zvyšuje se zvyšujícím se sklonem střechy (například během srážkové události z 21. července 2012, která byla největší v Pekingu za posledních 60 let, vygeneroval *infiltration-excess* 6 % celkového odtoku a při sklonu střechy 30° by vygeneroval 9,3 % celkového odtoku).

Ověřit, zda *HYDRUS-1D* dokáže spolehlivě simulovat odtok ze zelených střech, se také pokusili Hakimdavar et al. (2014). Zaměřovali se především na mechanismus, jak vlastnosti srážkových událostí a plocha zelené střechy ovlivňuje charakter odtoku. Z měření srážkové a odtokové výšky na třech zelených střechách (stejněho stáří a konstrukce, pouze odlišné plochy 310 m², 99 m² a 0,09 m²), umístěných v New Yorku, zjistili, že velikost záchytné plochy má největší vliv na velikost špičkového odtoku. Větší plochy zmírnili špičkové odtoky více než menší plochy. Velikost záchytné plochy naopak neovlivňuje retenční schopnost zelené střechy (vztaženou na 1 m² plochy) a velmi mírně ovlivňuje zpoždění odtoku oproti srážce. Uspokojivě se jim povedlo (dle kritérií shody modelu s měřením) simulovat 17 z 38 srážkových událostí. Problémem byly menší srážky, vyžadující přesné určení počátečního vlhkostního stavu zelené střechy. Dále pak

heterogenita substrátu, která odtok ovlivňuje tím více, čím menší je záchytná plocha. Schopnost modelu *HYDRUS-1D* simulovat odtok ze zelených střech se tedy podle této studie zvyšuje se zvětšující se záchytnou plochou a zvětšujícím se úhrnem příčinné srážky.

2.3. SWMM LID-GR

V roce 2010 byl do veřejně přístupného programu *Stormwater Management Model* (SWMM), vyvíjeného americkou agenturou *Environmental Protection Agency* (EPA) implementován *LID* modul. Následně byl do tohoto modulu přidán nový nástroj *LID-GR*, umožňující simulaci hydrologického chování zelených střech. Krebs et al. (2016) se pokusili pomocí *LID-GR* nástroje simulovat odtok z experimentálního segmentu zelené střechy (s plochou 2 m² a sklonem 8 %), umístěného ve finském Lahti. Přišli na to, že model dobře simuluje odtok ze segmentu, hlavně pak během epizod s vyššími odtokovými koeficienty a vyšší intenzitou odtoku. Dobře také simuluje obnovu retenční kapacity substrátu v období mezi srážkovými událostmi. Pro získání relevantních výsledků je podle nich důležité správně stanovit (nebo pomocí měřených dat kalibrovat) hodnoty parametrů všech vrstev (povrchové, půdní a drenážní). Dále provedli citlivostní analýzu všech parametrů, která ukázala, že nejcitlivějším parametrem modelu je pórovitost půdy, určující schopnost substrátu zadržovat vodu.

3. Materiály a metody

3.1. Popis experimentu

Experiment se zabývá odtokem srážkové vody ze dvou segmentů zelených střech (dále v práci nazývaných S1, S2), nacházejících se v Buštěhradu na extenzivní zelené střeše Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB, souřadnice 50°9.41797'N, 14°10.19195'E, nadmořská výška 355 m) s plochou 941 m² a průměrným sklonem 2 %. Střecha se nachází 10 metrů nad okolním terénem. Oblast je charakteristická mírným klimatem s průměrným ročním srážkovým úhrnem 500 mm a průměrnou roční teplotou 8°C.

Na střeše budovy se nachází celkem šest experimentálních segmentů zelených střech. S1 a S2 byly sestaveny nad úroveň střechy budovy v červnu roku 2014 (Obr. 1). Koncem května roku 2015 byly přidány další dva podobné segmenty. Poslední dva segmenty byly zabudovány přímo do střechy v roce 2016.

Ve vzdálenosti přibližně 2 metry od segmentů je umístěn překlopný srážkoměr Young 52202 (R. M. Young Company, rozlišení 0,1 mm) se zachytnou plochou 200 cm². Vrchní hrana srážkoměru se nachází ve výšce 1 metr nad úrovní střechy budovy. Vytápění a odolnost proti korozi umožňuje jeho celoroční použití. K dispozici jsou také automatická kontinuální hydrometeorologická měření teploty a vlhkosti vzduchu, rychlosti a směru větru, relativní vlhkosti vzduchu a čisté radiace. Všechna data jsou zaznamenávána v minutových intervalech.



Obr. 1: Snímky dvou testovacích segmentů S1 (vlevo) a S2 (vpravo) na střeše budovy UCEEB v Buštěhradu (pořízeny Bc. Jitkou Hanzlíkovou 30. srpna 2017).

3.2. Konstrukce segmentů zelených střech a jejich vybavení

Segmenty S1 a S2 jsou vybaveny překlopnými průtokoměry (sestrojenými v dílně Katedry hydrauliky a hydrologie, ČVUT v Praze) s možností měřit intenzitu odtoku v rozmezí 0,065 až 75 mm/hod. V substrátu segmentů jsou zabudována teplotní čidla. Hmotnost segmentu S2 je navíc

měřena vysoce přesnými voděodolnými vahami LCMAD-100 (Omega Engineering Ltd., Manchester, UK) v 5minutových krocích. Segmenty mají výsuvné nohy s nastavitelným sklonem v rozmezí 0 až 5° a kovovou izolovanou konstrukci, aby nedocházelo k nechtěnému ovlivňování okolní teplotou. Jejich efektivní plocha je 1 m².

Vertikální řez segmenty je následující: vegetační extenzivní pokryv (rozchodníky), substrát (tloušťky 50 mm, viz níže), filtrační vrstva (geotextílie), drenážní vrstva (nopová fólie, Optigreen type FKD 25 W), ochranná vrstva (geotextílie), hydroizolační vrstva a tepelná izolace (extrudovaný polystyren).

Jediný rozdíl mezi oběma segmenty je použitý substrát. U segmentu S1 byla použita ornice s lehkými anorganickými komponenty stržená při stavbě budovy UCEEB z blízké komunikace (objemová hmotnost 1,15 g/m³, obsah organické hmoty 2,30 %). Tento typ půdního substrátu je někdy nazýván Technosol. Segment S2 je pokryt komerčním lehkým substrátem (Optigreen green roof extensive substrate Type E) s obsahem expandované břidlice, lávy, pemzy, jílu, rozdrčených cihel a zeleného odpadního kompostu (objemová hmotnost 0,77 g/m³; obsah organické hmoty 0,73 %). Vegetace byla vysázeny 9. července 2014 do segmentu S1 a 4. září 2014 do S2. Pro osázení byla použita směs rozchodníků (*Sedum album*, *Sedum hybridum*, *Sedum spurium*, *Sedum acre*). Vývoj vegetačního pokryvu byl průběžně monitorován. Více informací o měření antropogenních půdních systémech v areálu UCEEB lze nalézt v článku Jelínkové et al. (2016).

3.3. Vyhodnocované epizody

K dispozici byla nepřerušená řada dat z překlopných průtokoměrů, umístěných na segmentech S1 a S2 a překlopného srážkoměru, nacházejícího se na střeše budovy poblíž segmentů. Použito bylo měření od 1. září roku 2014 do 24. dubna roku 2017. Z dat byla vyjmuta období od prosince do března, protože je průtokoměr na zimu odinstalován. Provoz průtokoměru by při teplotách kolem a pod 0°C neposkytoval relevantní výsledky, navíc by hrozilo při zamrznutí vody uvnitř něj jeho poškození. Získaná měření v minutových intervalech byla pro účel modelování odtoku převedena na 5minutové kroky. V souboru byly hledány srážko-odtokové epizody s úhrnem větším než 6 mm. Minimální bezdeštné období mezi epizodami bylo nastaveno na 6 hodin. Jedinou výjimkou je relativně dlouhá epizoda č. 16 (viz Tab. 1), v jejímž průběhu je bezdeštné období větší než 6 hodin, během kterého ovšem stále pokračuje odtok. Odtoková křivka prvního deště epizody se překrývá s odtokovou křivkou druhého deště. Odděleně by tedy nebylo možné odtok rozumně modelovat. Začátky epizod jsou současně prvním překlopením srážkoměru. Konce epizod byly vyhodnoceny pro každý z modelů odlišným způsobem, který je popsán níže.

Takto bylo nalezeno 8 epizod ve vegetačním období 2014, 11 epizod ve vegetačním období 2015, 12 epizod ve vegetačním období 2016 a 2 ve vegetačním období 2017. Základní charakteristiky srážko-odtokových epizod (číslo epizody, čas začátku, doba trvání, velikost srážkového úhrnu, maximální intenzita srážky a odtokové koeficienty segmentů) je možné nalézt v Tab. 1.

Tab. 1: Základní parametry srážko-odtokových epizod, použitých k modelování odtoku ze segmentů zelených střech S1 a S2. Epizody z let 2014 a 2015 byly použity pro kalibraci modelu, epizody z let 2016 a 2017 pro jeho validaci. Během epizod č. 14, 16, 29 a 30, kdy byl zjištěn odtokový koeficient $> 0,98$, je stanovení odtokové výšky ovlivněno selháním měření nebo jinými měřicími nejistotami. Možné příčiny jsou diskutovány v kapitole 4.1.

Číslo	Čas počátku	Doba trvání (min)	Srážkový úhrn (mm)	Max. srážková intenzita (mm/hod)	Odtokový koeficient S1 (–)	Odtokový koeficient S2 (–)
1	08. 09. 2014 15:05	870	6,6	32,4	0,038	0,530
2	11. 09. 2014 15:20	1750	51,4	30,0	0,646	0,761
3	21. 09. 2014 19:45	525	12,2	38,4	0,170	0,495
4	13. 10. 2014 23:00	685	14,4	12,0	0,092	0,706
5	15. 10. 2014 10:50	660	7,5	16,8	0,311	0,832
6	21. 10. 2014 22:00	530	6,1	12,0	0,052	0,373
7	22. 10. 2014 11:55	1320	6,1	2,4	0,392	0,980
8	18. 11. 2014 02:55	2230	23,4	4,8	0,302	0,967
9	27. 04. 2015 19:15	1515	17,3	30,0	0,168	0,578
10	05. 05. 2015 21:30	895	10,4	6,0	0,048	0,487
11	08. 06. 2015 21:50	940	13,9	6,0	0,122	0,552
12	25. 07. 2015 05:35	315	6,0	30,0	0,021	0,314
13	16. 08. 2015 16:00	735	14,9	43,2	0,114	0,681
14	17. 08. 2015 07:15	2185	34,9	8,4	0,897	$>0,98$
15	07. 10. 2015 04:35	2045	20,2	6,0	0,327	0,801
16	14. 10. 2015 03:10	3320	18,3	6,0	0,933	$>0,98$
17	19. 11. 2015 16:35	895	13,2	19,2	0,286	0,657
18	29. 11. 2015 23:15	2200	12,2	6,0	0,775	0,762
19	13. 04. 2016 20:05	355	10,2	19,2	0,031	0,508
20	23. 05. 2016 16:40	670	29,2	122,4	0,509	0,927
21	31. 05. 2016 14:50	290	7,0	19,2	0,018	0,223
22	02. 06. 2016 17:50	1065	6,8	4,8	0,056	0,440
23	16. 06. 2016 20:30	1225	17,3	22,8	0,142	0,606
24	25. 06. 2016 22:00	680	10,3	21,6	0,018	0,183
25	13. 07. 2016 17:45	1510	14,1	4,8	0,045	0,401
26	23. 07. 2016 17:35	295	7,1	31,2	0,035	0,119
27	05. 08. 2016 03:05	865	18,6	31,2	0,230	0,654
28	18. 09. 2016 10:35	2030	6,0	1,2	0,399	0,282
29	04. 10. 2016 01:35	645	10,7	6,0	0,895	$>0,98$
30	05. 10. 2016 16:45	1960	14,4	2,4	$>0,98$	$>0,98$
31	03. 04. 2017 01:20	350	6,1	10,8	0,041	0,096
32	03. 04. 2017 13:50	1495	12,1	6,0	0,422	0,972

Použita byla také data z vah umístěných pod segment S2, měřících jeho hmotnost od 9. června 2015 do 4. listopadu 2016.

3.4. Stanovení IDF křivek

IDF křivky (z anglického *intensity–duration–frequency curves*) graficky vyjadřují vztah mezi intenzitou, dobou trvání a periodicitou deště. Pro vykreslení těchto křivek je třeba historického dlouhodobého pozorování, které obsahuje přívalové deště. Tyto deště zasahují pouze malé plochy a vyžadují tedy hustou síť srážkoměrných stanic. Stanovení *IDF* křivek je z těchto důvodů obtížné (Kemel, 2000). Používají se k určení návrhových srážek, využívaných například při dimenzování stokových sítí nebo pro srážkoodtokové modelování. Pro danou oblast je možné sestavit *IDF* křivky například podle metodiky Němce (1965), který navrhl vztah mezi i , t a N deště:

$$i = \frac{H_s}{t} = \frac{(a \cdot \log t + b) \cdot N^n}{t} \quad (1)$$

kde i je náhradní intenzita deště (mm/min), H_s dešťový úhrn (mm), t doba deště (min), N počet let, za který je intenzita v dlouhodobém průměru dosažena nebo překročena a a , b , n jsou parametry pro jednotlivé srážkoměrné stanice. Němec získal tento výraz extrapolací známější řady navržené Truplem v roce 1958 s využitím teoretické křivky Goodriche v úpravě Alexejeva. Pro výpočet například kulminačních průtoků v uzávěrových profilech malých přirozených povodí je ovšem vhodnější práce Němce.

3.5. Model na bázi nelineárního rezervoáru

Pro modelování odtoku srážkové vody ze segmentů zelených střech $S1$ a $S2$ byl nejprve použit dvouparametrický model na bázi jednoduchého nelineárního rezervoáru (*simple storage routing model*, dále v práci označován jako *SSR model*). Tento model byl popsán a použit Kasminem et al. (2010). Lze ho použít k predikci odtoku dešťové vody z jednoduchých infiltračních systémů. Předpokladem modelu je, že voda začne odtékat ze segmentu po vyčerpání retenční a retenční kapacity substrátu a drenážní vrstvy, označovaných souhrnně jako zásoba vody S . Počáteční vlhkostní stav segmentu, závisující na délce předcházející bezdeštného období a intenzitě evapotranspirace během něj, není v tomto případě stanoven. Zásobu vody počítá model v každém časovém kroku pomocí rovnice:

$$S_i = S_{i-1} + P_i - Q_i \quad (2)$$

kde S_{i-1} (mm) je zásoba vody v předchozím časovém kroku, P_i (mm) je srážková úhrn a Q_i (mm) specifický odtok ze segmentu v daném časovém kroku i . Všechny proměnné jsou v 5minutových časových krocích. Evapotranspirace je během srážkových událostí zanedbatelná, proto zde není uvažována. U segmentů není uvažován ani povrchový odtok, protože je propustnost použitých

substrátů relativně vysoká a konstrukce má velmi malý sklon. P_i je dáno měřenými srážkovými hodnotami, Q_i je dáno rovnicí:

$$Q_i = k_k S_{i-1}^{n_k} \quad (3)$$

kde n_k (-) a k_k (mm^(1-n_k)/min) jsou parametry SSR modelu.

Konec epizody u SSR modelu byl nastaven na dobu 240 minut po posledním překlopení srážkoměru. Za tuto dobu spolehlivě vyteče přebytečná voda ze segmentu.

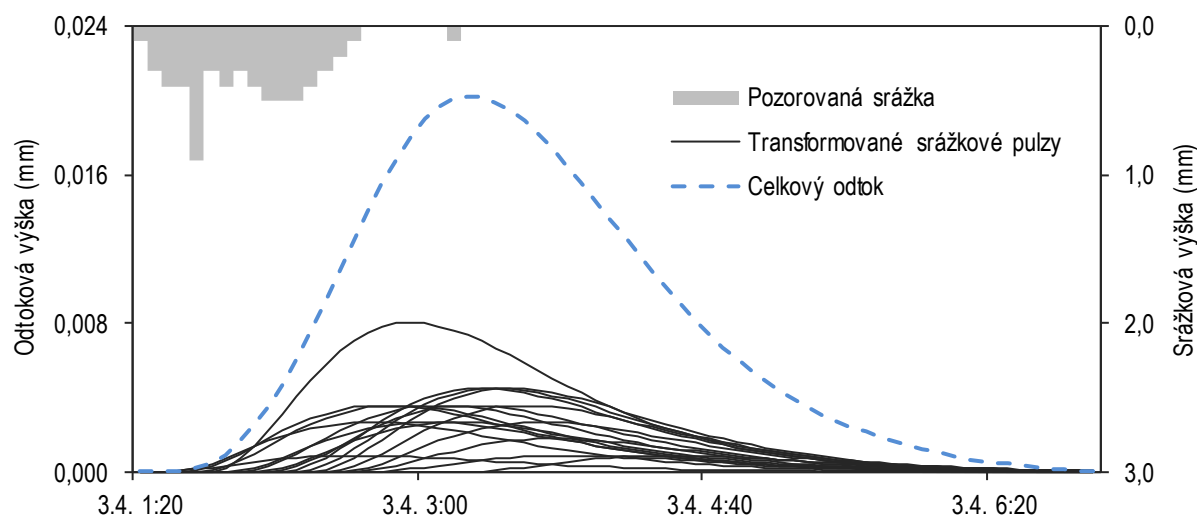
3.6. Model na principu okamžitého jednotkového hydrogramu

Odtok byl pro porovnání se SSR modelem počítán alternativně modelem na principu kaskády lineárních rezervoárů (nebo také okamžitého jednotkového hydrogramu, dále v práci označován jako IUH model – z anglického *Instantaneous Unit Hydrograph*). Nash (1957) odvodil rovnici pro IUH za předpokladu, že pro systémy pracující s efektivní srážkou může být použita kaskáda lineárních rezervoárů:

$$u = \frac{1}{k_{IUH} \cdot \Gamma(n_{IUH})} e^{-t/k_{IUH}} \left(\frac{t}{k_{IUH}} \right)^{n_{IUH}-1} \quad (4)$$

kde u je hodnota pořadnice jednotkového hydrogramu, k_{IUH} je exponenciální rozpadová konstanta (min), n_{IUH} je bezrozměrný empirický parametr odpovídající počtu lineárních rezervoárů v kaskádě, $\Gamma(n_{IUH}) = (n_{IUH} - 1)!$ je gama rozdělení pravděpodobnosti a t je označení časového kroku v rámci epizody (min). Pořadnice u tvoří transformační funkci. Pomocí transformační funkce je převeden každý ze srážkových pulzů na odtokovou křivku. Výsledný odtok vzniká sečtením jednotlivých odtokových křivek. Graficky je znázorněn příklad tohoto výpočtu na Obr. 2. Počet pořadnic u transformační funkce je dán počtem naměřených srážkových a odtokových pulzů.

Konec epizod byl u IUH modelu nastaven na poslední překlopení srážkoměru navýšené o počet pořadnic u minus 1, aby byl plně transformován poslední srážkový pulz. U epizod s extrémně dlouho trvajícím odtokem byl navíc připočten individuální počet časových kroků. Rozdílný postup při stanovení konce epizod u IUH modelu a SSR modelu má za následek odlišné odtokové výšky během některých epizod. Tento rozdíl je řádově v desetinách mm a nijak proto neovlivňuje předkládané závěry.



Obr. 2: Příklad výpočtu odtoku *IUH* modelem. Každý se srážkových pulzů je převeden transformační funkcí na dílčí odtokovou křivku. Následně jsou hodnoty dílčích křivek v každém časovém kroku sečteny a vzniká tak celkový odtok.

3.7. Optimalizační proces a měření kvality modelu

Parametry obou modelů pro oba segmenty byly optimalizovány individuálně pro každou z vybraných epizod (scénář A) s pomocí zobecněné gradientní metody nelineární optimalizace (Fylstra et al., 1998). Cílovou funkcí byla suma kvadrátů odchylek kumulativního vypočítaného odtoku a měřeného odtoku. Kvůli posouzení, jak počáteční odhad parametrů ovlivňuje optimalizační proces, byly zvoleny čtyři sady parametrů k a n , rozdílné pro každý z modelů (viz Tab. 2), v textu dále označované jako *POx*. Všechny sady parametrů, kromě *PO1*, byly zvoleny tak, aby rozumně reprezentovaly možné hodnoty v parametrickém prostoru. *PO1* byl zvolen podle Kasmína et al. (2010), kteří doporučují pro k_k zvolit hodnotu 0,15 (respektive 0,03 při minutových krocích) a pro n_k 2,0.

Tab. 2: Seznam počátečních odhadů parametrů pro *SSR* model (k_k a n_k), a *IUH* model (k_{IUH} a n_{IUH}).

Model	Parametr	<i>PO1</i>	<i>PO2</i>	<i>PO3</i>	<i>PO4</i>
Jednoduchý nelineární rezervoár	n_k (–)	2	3	4	5
	k_k (mm ⁽¹⁻ⁿ⁾ /min)	0,15	0,2	0,01	0,001
		<i>PO5</i>	<i>PO6</i>	<i>PO7</i>	<i>PO8</i>
Okamžitý jednotkový hydrogram	n_{IUH} (–)	2	4	5	7
	k_{IUH} (min)	1	0,6	15	50

Optimalizace byla také spuštěna pro všechny epizody v daných vegetačních sezónách dohromady (scénář B) a pro celý soubor epizod v kalibračním období (scénář C) se stejnými počátečními odhady jako v případě individuální optimalizace (scénáře A).

Parametry byly při optimalizaci omezeny u obou modelů následujícím způsobem: n může být pouze celé číslo v rozmezí 2 až 10 a k může být pouze kladné číslo. Hledání pouze celočíselných hodnot parametru n vychází z předpokladu, že se u *IUH* modelu jedná o počet lineárních rezervoárů v kaskádě.

Kvalita shody modelu s měřeními byla posouzena třemi ukazateli. Prvním je zobecněná směrodatná odchylka *RMSE* (zkratka z anglického *root mean square error*), která není ovlivněna počtem časových kroků, stejně jako suma kvadrátů odchylek a je proto vhodnější k posouzení kvality předpovědi modelu:

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (Q_{c_i} - Q_{c_i}^*)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

kde Q_c je modelem vypočítaná hodnota kumulativního odtoku, Q_c^* je pozorovaná hodnota kumulativního odtoku, i je časový krok a n počet časových kroků zahrnutých do hodnocení. Dalším ukazatelem shody je modelová efektivita *NSE* z anglického *Nash–Sutcliffe model efficiency* (Nash a Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (\mu - Q_i)^2} \quad (6)$$

kde Q je modelem vypočítaná hodnota odtoku, Q^* je pozorovaná hodnota odtoku a μ průměr měřeného odtoku. Hodnoty kritéria *NSE* se pohybují v rozmezí od $-\infty$ do 1. Hodnota *NSE* menší než 0 znamená, že je průměr měřeného odtoku μ lepší než samotný model. *NSE* rovno 1 indikuje perfektní shodu modelu se skutečným odtokem. Jako poslední byla použita objemová odchylka *VE* (z anglického *volume error*), která popisuje přesnost modelu s ohledem na objem skutečného odtoku. Je vypočítána pomocí vztahu:

$$VE = \frac{q^* - q}{q^*} \cdot 100 \quad (7)$$

kde q^* je celková naměřená odtoková výška ze segmentu během epizody (mm) a q celková vypočítaná odtoková výška (mm). Záporné hodnoty *VE* značí, že je měřený odtok menší než vypočítaný. V případě kladného *VE* je měřený odtok naopak větší.

3.8. Validační proces

Sady parametrů získané procesem kalibrace (optimalizací parametrů SSR modelu a *IUH* modelu s různými počátečními odhady) byly postupně ověřovány na měřených datech z vegetačních sezón 2016 a 2017 (viz Tab. 1). Ve validačním období je 12 epizod ze sezóny 2016 a 2 epizody ze sezóny 2017. Charakter epizod (doba trvání, úhrn, maximální intenzita) je podobný jako charakter epizod v kalibračním období. Soubory se liší pouze tím, že ve validačním období chybí epizody se srážkovým úhrnem větším než 30 mm, které jsou v kalibračním období dvě a epizoda č. 20 (z validační sezóny 2016), má oproti ostatním výraznou maximální intenzitu 122,4 mm/hod. Úspěšnost validace je popsána v kapitole 4.8.

4. Výsledky a diskuze

4.1. Odtokové charakteristiky segmentů zelených střech

Hydrologické vlastnosti zelených střech jsou posuzovány v první řadě odtokovým koeficientem, který vyjadřuje, jaké procento vody odteče v porovnání se srážkovým úhrnem. Segment S1 transformuje odtok výrazněji, vytéká z něj znatelně méně vody než ze segmentu S2. Důvodem jsou především použité substráty, o kterých se lze dočíst více v práci Jelínkové et al. (2015). Odtokové koeficienty jsou uvedeny společně s naměřeným srážkovými a odtokovými úhrny v Tab. 3. Přesný kumulativní průběh srážkové výšky a odtokových výšek obou segmentů v jednotlivých vegetačních sezónách je zobrazen na Obr. 10 v Přílohách.

Přestože došlo v roce 2016 oproti roku 2015 k mírnému navýšení odtokových koeficientů u obou segmentů, vykazují odtokové koeficienty klesající trend (spojnice trendu mají koeficient determinace 0,72 u segmentu S2 a 0,80 u segmentu S1). Způsobeno je to především vyšší pokryvností vegetace (Jelínková et al., 2016) a konsolidací půdy. Další příčinou může být prorůstáním kořenového systému rostlin přes ochrannou geotextilní vrstvu do drenážní vrstvy. Toto bylo zjištěno a zdokumentováno u obou segmentů při výměně substrátu a vegetace, uskutečněné 30. srpna 2017 (Obr. 3). Přesný vliv prorůstání kořenového systému drenážní fólií na odtokové poměry segmentů nebyl zjištěn. Voda, odtékající drenážním systémem, může být zadržena a přes rostliny vracena zpět do atmosféry transpirací. Kořínky mohou navíc v některých místech nopovou fólii zcela utěsnit. Tím by se snížilo množství vyteklé vody a s ním související odtokový koeficient. Na druhou stranu, rozrůstající se kořínky snižují retenční kapacitu nopové fólie (která je standardně v tomto případě 5,0 l/m²) a vytvářejí preferenční cesty v ochranné vrstvě, což by vedlo ke zvýšení odtokového množství.

Tab. 3: Srážkový úhrn a odtokové výšky segmentů S1 a S2 ve vegetačních sezónách s příslušnými odtokovými koeficienty. Vzhledem k rozdílnému trvání vegetačních sezón (zahrnujících rozdílná roční období), nelze porovnávat srážkové a odtokové úhrny mezi sebou.

Vegetační sezóna	Délka sezóny (dny)	Srážkový úhrn (mm)	Odtoková výška S1 (mm)	Odtoková výška S2 (mm)	Odtokový koeficient S1 (–)	Odtokový koeficient S2 (–)
2014	90	160	60	117	0,376	0,732
2015	243	340	95	157	0,281	0,462
2016	243	271	85	148	0,313	0,547
2017	23	39	7	14	0,171	0,354



Obr. 3: Kořenový systém rostlin prorůstající přes ochranu geotextílii do nopové fólie segmentu S1 (vlevo) a segmentu S2 (vpravo). Snímky byly pořízeny Bc. Jitkou Hanzlíkovou 30. srpna 2017 během výměny substrátu a vegetace.

Závislost odtokové a srážkové výšky

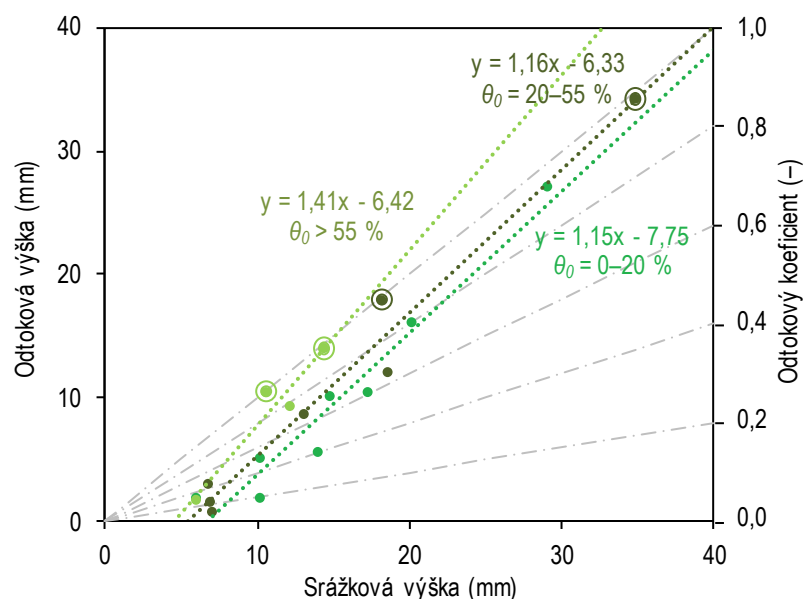
Dále byl zjištěn vztah mezi srážkovou výškou a odtokovou výškou segmentů S1 a S2 během srážko-odtokových epizod. Nejlépe lze srážkové a odtokové výšky epizod č. 12 až 30 proložit, oproti ostatním křivkám, lineární regresí s korelačním koeficientem 0,63 pro segment S1 a 0,93 pro S2. Během těchto epizod byla měřena hmotnost segmentu S2, ze které je možné odhadnout vlhkostní poměry substrátu na počátku epizody. Zahrnutím počáteční vlhkosti lze významně zlepšit závislost srážkové a odtokové výšky epizod.

Podobnou závislost odtokové a srážkové výšky popsali ve své práci také Yang et al. (2015). Jejich cílem bylo odhadnout pomocí této závislosti množství odtoku ze zelených střech a porovnat ji s ostatními publikovanými studiemi. Kromě toho, že počáteční vlhkost hraje významnou roli ve srážko-odtokovém vztahu, připsali podobný význam hloubce substrátu. Při návrhu vegetačních střech je podle nich tedy důležité přednostně zvolit hloubku a retenční schopnost substrátu. Srážko-odtokový vztah je ovšem empirický. Nelze ho použít při návrhu jiné vegetační střechy, proto byla jeho platnost ověřena i v této práci.

V období, kdy byla měřena hmotnost segmentu S2, byla nalezena její minimální hodnota $m_{min} = 74,2$ kg (pro tento stav je považován substrát segmentu za suchý, blízký reziduální vlhkosti, pracovní relativní vlhkost $\theta = 0$ %) a maximální hodnota hmotnosti $m_{max} = 93,1$ kg (odpovídající nasycené vlhkosti, relativní vlhkost $\theta = 100$ %). Retenční kapacita substrátu, zásobní prostor drenážní vrstvy, intercepce na vegetaci rozchodníků a smáčení konstrukce segmentu (seřazeno od nejvýznamnějšího dle schopnosti zadržet srážkovou vodu) tedy představuje cca 18,9 kg vody (18,9 mm). Tento prostor byl pro potřeby práce rozdělen do tří skupin podle míry jeho využití na počátku srážko-odtokové epizody (dále označený jako počáteční vlhkostní stav θ_0), $\theta_0 = 0-20$ %, $\theta_0 = 20-55$ % a $\theta_0 > 55$ %.

U každé z epizod č. 12 až 30 byl určen počáteční vlhkostní stav. Závislost srážkové a odtokové výšky epizod rozdělených do zmíněných tříd je zobrazena na Obr. 4. U tříd $\theta_0 = 0-20$ %

a $\theta_0 = 20\text{--}55\%$ se korelační koeficient zvýšil z 0,93 na 0,95 a 0,97. U třídy $\theta_0 > 55\%$ zůstal koeficient determinace 0,93. Důvodem může být velký rozsah třídy a především skutečnost, že obsahuje pouze 4 epizody. Z Obr. 4 je dále patrné, že se zvyšující se počáteční vlhkostí roste odtokový koeficient epizody s určitou srážkovou výškou (retenční schopnost segmentu se snižuje). U menších srážek přirozeně rozhoduje o odtokovém koeficientu počáteční vlhkost více než u větších. Například epizody s $\theta_0 = 20\text{--}55\%$ generují odtok o přibližně 4 % větší než epizody s $\theta_0 = 0\text{--}20\%$ u srážek s úhrnem nad 40 mm a o více než 500 % u srážek s úhrnem pod 7 mm (detaily jsou na Obr. 11 v Přílohách). Také je třeba upozornit na trendovou čáru třídy $\theta_0 > 55\%$, která protíná linii označující odtokový koeficient rovný 1,0. Způsobeno je to dvěma epizodami s odtokovým koeficient větším než 0,98 v této třídě. Všechny epizody s odtokovým koeficientem větším než 0,98 (č. 14, 16, 29 a 30) jsou v obrázku označeny obrysem. Důvodem takto velkého poměru srážky a odtoku může být dočasná chyba překlopného průtokoměru (zaplavení), u epizod do poloviny roku 2016 nezakrytý dešťový svod, odvádějící vodu ze segmentů (viz Skala, 2016) nebo překrývající se odtokové křivky dvou epizod (jako tomu je u epizody č. 16, popsané v kapitole 3.3.).

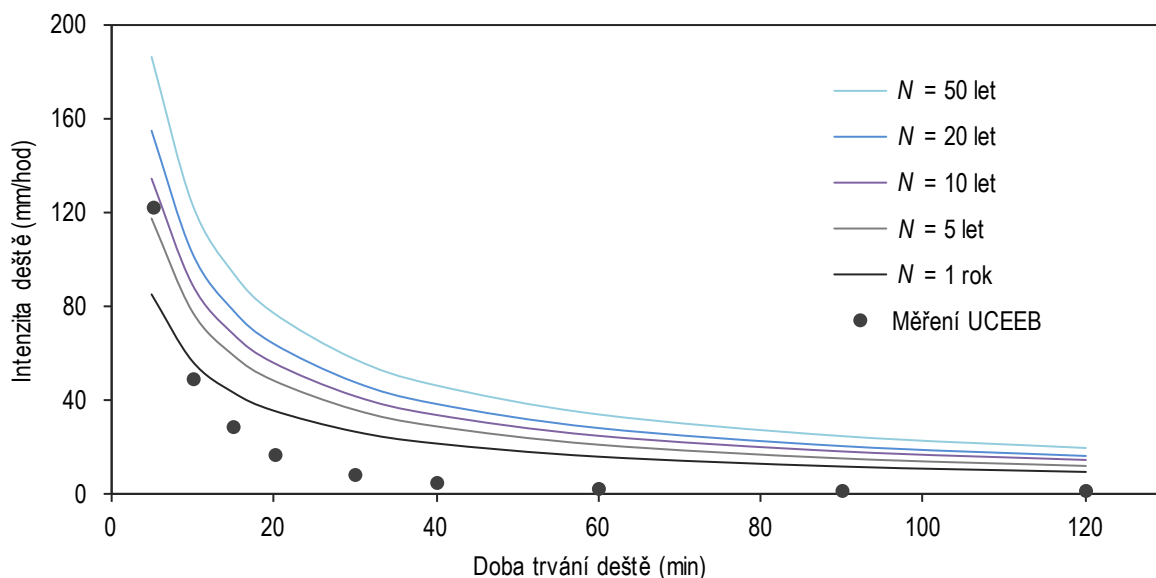


Obr. 4: Lineární závislost srážkové a odtokové výšky naměřených během epizod č. 12 až 30 u segmentu S2, rozdělených do tří tříd podle počátečního vlhkostního stavu θ_0 . Obrysem jsou označeny epizody s odtokovým koeficient větším než 0,98. Čerchované čáry vyjadřují spojnice shodných hodnot odtokových koeficientů.

4.2. Porovnání s návrhovou srážkou

Pro porovnání s dešti v celém použitém datovém souboru byly podle metodiky popsané v kapitole 3.4. sestaveny *IDF* křivky. Do vzorce (1) pro výpočet návrhové intenzity srážky byly dosazeny doby trvání 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90 a 120 minut a doby opakování 1, 5, 10, 20 a 50 let. Použity byly parametry pro oblast Kladenska $a = 7,7$; $b = 1,7$; $n = 0,2$ podle Němce (1965).

Vypočítané intenzity, proložené křivkami, jsou znázorněny na Obr. 5. Aby bylo možné porovnat srážky v datovém souboru s vypočítanými návrhovými srážkami, byly v jednotlivých vegetačních sezónách nalezeny maximální intenzity dešťů v mm/hod s dobou trvání stejnou jako výše v tomto odstavci.



Obr. 5: IDF křivky pro Kladno dle Němce v porovnání s maximálními srážkovými intenzitami dešťů v celém použitém datovém souboru s dobou trvání 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90 a 120 minut.

Při porovnání naměřených srážek s vypočítanými srážkami bylo zjištěno, že jedna 5minutová srážka z roku 2016 s intenzitou 122,4 mm/hod má dobu opakování 7 let. Ostatní srážky nemají dobu opakování větší než 1 rok. Z toho vyplývá, že studovaná vegetační období z let 2014–2017 neobsahují, s výše uvedenou výjimkou, extrémnější deště, které by mohly ovlivnit výsledky modelování odtoku. Vzhledem k této skutečnosti nelze v následující práci potvrdit, že by modely počítaly odtok způsobený extrémními srážkami s vyšší nebo naopak nižší přesností než odtok při běžných srážkách.

4.3. Scénář A – individuální optimalizace srážko-odtokových epizod

Nejprve byl vypočten odtok ze segmentů pomocí dvou modelů popsanych v kapitolách 3.5. a 3.6. za použití všech osmi počátečních odhadů (*PO1–PO4* pro *SSR* model, *PO5–PO8* pro *IUH* model). Následně byly optimalizovány parametry *k* a *n* pro každou z epizod individuálně (scénář A) tak, aby se co nejvíce snížila hodnota cílové funkce. Cílovou funkcí byla zvolena suma kvadrátů odchylek skutečného a vypočítaného kumulativního odtoku (upřednostněna byla shoda měřené a modelované odtokové výšky před ostatními vlastnostmi hydrogramu, z důvodu její důležitosti při uplatnění modelů v praxi).

Kompletní hodnoty optimálních parametrů pro každou epizodu vzešlé z jednotlivých počátečních odhadů jsou v Přílohách v Tab. 10–Tab. 13 pro *SSR* model a v Tab. 14–Tab. 17

pro *IUH* model, společně s ukazateli kvality modelu (zobecněnou směrodatnou odchylkou, modelovou efektivitou a objemovou odchylkou). Pro každou epizodu u obou modelů byly vybrány z tabulek parametry vedoucí na nejvyšší hodnotu modelové efektivity *NSE*. Hodnoty těchto parametrů pro *SSR* model jsou prezentovány v Tab. 4 a v Tab. 5 pro *IUH* model, společně s ukazateli kvality modelu.

Tab. 4: Optimální hodnoty parametrů v případě *SSR* modelu a scénáře A. Vybrány jsou nejlepší optimální parametrické sady (dle modelové efektivity *NSE*) ze všech 4 sad počátečních odhadů. Uvedeny jsou také příslušné hodnoty kvality shody modelu s měřením (*RMSE*, *NSE* a *VE*).

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	k_k (mm ^(1-n_k) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	k_k (mm ^(1-n_k) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	1,05E-05	3	-0,03	0,10	-49	5,34E-07	9	-0,49	0,35	-13
2	6,78E-04	2	0,10	2,33	-19	2,93E-03	2	0,16	3,53	-22
3	2,58E-04	2	-0,01	0,39	-28	1,13E-06	6	0,27	1,17	-24
4	1,48E-04	2	-0,07	0,26	-39	1,00E-07	9	0,94	0,35	-7
5	1,05E-03	2	0,06	0,36	-24	1,61E-03	6	0,86	0,12	-1
6	1,00E-07	6	-0,02	0,12	-16	1,08E-07	9	0,58	0,30	-23
7	1,14E-03	2	0,09	0,20	-14	3,96E-02	2	0,68	0,10	3
8	1,27E-04	2	-0,08	1,02	-25	7,36E-03	2	0,71	0,50	2
9	2,86E-07	4	0,08	0,47	11	1,08E-07	7	0,41	1,35	-22
10	1,08E-04	2	-0,13	0,14	-49	1,06E-07	8	0,89	0,45	-22
11	1,38E-04	2	0,01	0,27	-33	1,10E-07	7	0,84	0,46	-14
12	9,71E-05	2	-0,02	0,05	-48	1,09E-07	9	0,44	0,41	-34
13	1,03E-04	2	-0,04	0,71	-47	1,00E-07	8	0,95	0,55	-9
14	1,12E-07	8	0,51	0,83	2	4,57E-01	2	0,52	0,83	6
15	6,99E-07	4	0,12	0,29	-7	1,00E-07	9	0,75	0,46	-4
16	1,00E-07	9	0,45	1,20	12	7,75E-03	2	0,46	1,44	9
17	5,18E-07	5	0,32	0,57	-27	4,01E-07	7	0,83	0,25	-4
18	8,95E-07	9	0,46	0,07	-2	1,89E-06	8	0,32	0,21	-2
Průměr	2,14E-04	4	0,10	0,52	25*	2,87E-02	6	0,56	0,71	12*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

U *SSR* modelu se *NSE* pohybuje v poměrně úzkém rozmezí od –0,13 do 0,52 s průměrnou hodnotou 0,10 pro segment *S1*, respektive od 0,16 do 0,95 (s jednou odlehlou hodnotou –0,49) s průměrem 0,58 pro *S2*. *RMSE* je pro oba segmenty podobně variabilní (od 0,07 mm do 3,53 mm) s průměrnou hodnotou 0,52 mm pro segment *S1* a 0,65 mm pro *S2*. Záporná hodnota *VE* u téměř všech epizod indikuje, že *SSR* model většinou podhodnotí množství vyteklé vody z obou segmentů.

Menší průměrné hodnoty *VE* dosahuje model u segmentu *S2*, což znamená, že u něj predikuje množství odtoku s větší přesností.

Tab. 5: Optimální hodnoty parametrů v případě *IUH* modelu a scénáře A. Vybrány jsou nejlepší optimální parametrické sady (dle modelové efektivity *NSE*) ze všech 4 sad počátečních odhadů. Uvedeny jsou také příslušné hodnoty kvality shody modelu s měřením (*RMSE*, *NSE* a *VE*).

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	74,1	2	-0,15	0,02	4	1,7	2	0,28	0,16	3
2	2,1	2	0,77	2,98	5	0,8	5	0,76	0,72	1
3	131,8	5	-0,30	0,72	-14	1,6	2	0,46	0,34	3
4	0,8	2	0,31	0,15	14	2,2	2	0,80	1,33	8
5	147,3	5	-0,14	0,72	-23	3,2	2	0,16	0,45	8
6	0,7	2	-0,01	0,05	13	1,3	2	0,00	0,33	12
7	57,0	5	-0,04	0,18	10	18,9	5	0,54	0,29	-2
8	1,2	2	-0,01	0,77	10	35,5	5	0,43	0,94	-2
9	0,9	2	-0,17	0,67	41	1,7	2	0,12	0,67	11
10	0,7	2	0,25	0,02	1	2,5	10	0,57	0,67	14
11	72,5	5	0,09	0,09	2	47,9	5	0,44	0,65	6
12	0,6	2	-0,10	0,01	2	21,5	5	-0,29	0,46	4
13	0,9	2	0,34	0,14	2	2,2	2	0,48	0,96	3
14	3,2	2	0,21	2,37	9	1,5	6	0,46	0,91	4
15	1,1	2	-0,22	1,51	28	2,6	2	0,34	1,09	7
16	41,2	5	0,07	1,94	10	14,4	5	0,13	1,88	10
17	1,2	2	0,38	0,59	13	2,0	2	0,77	1,25	11
18	15,3	5	0,26	0,73	7	47,5	5	-0,23	0,50	2
Průměr	30,7	3	0,09	0,76	7*	11,6	4	0,35	0,76	6*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

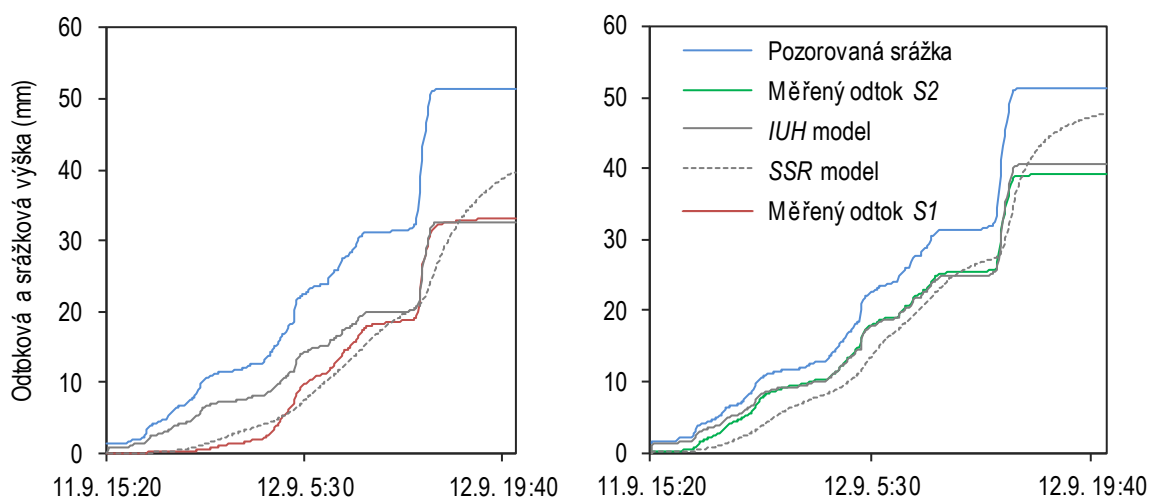
U modelu na principu okamžitého jednotkového hydrogramu se měření kvality modelu *NSE* pohybuje v rozmezí od -0,30 do 0,77 s průměrnou hodnotou 0,09 pro segment *S1*, respektive od -0,29 do 0,80 s průměrem 0,35 pro *S2*. Hodnota *RMSE* je pro oba segmenty podobně variabilní (od 0,01 mm do 2,98 mm) s průměrnou hodnotou 0,74 mm pro segment *S1* a 0,65 mm pro *S2*. Objemová odchylka je v tomto případě pro většinu epizod kladná. Model tedy množství vyteklé vody z obou segmentů většinou nadhodnotí. Stejně jako u *SSR* modelu je v predikci odtokového množství *IUH* modelu úspěšnější u segmentu *S2*.

Hodnotíme-li kalibraci dle ukazatelů *NSE* a *RMSE*, poskytuje *IUH* model mírně horší výsledky než *SSR* model. Z hlediska *VE* dává lepší výsledky *IUH* model. Ukazatele kvality modelu

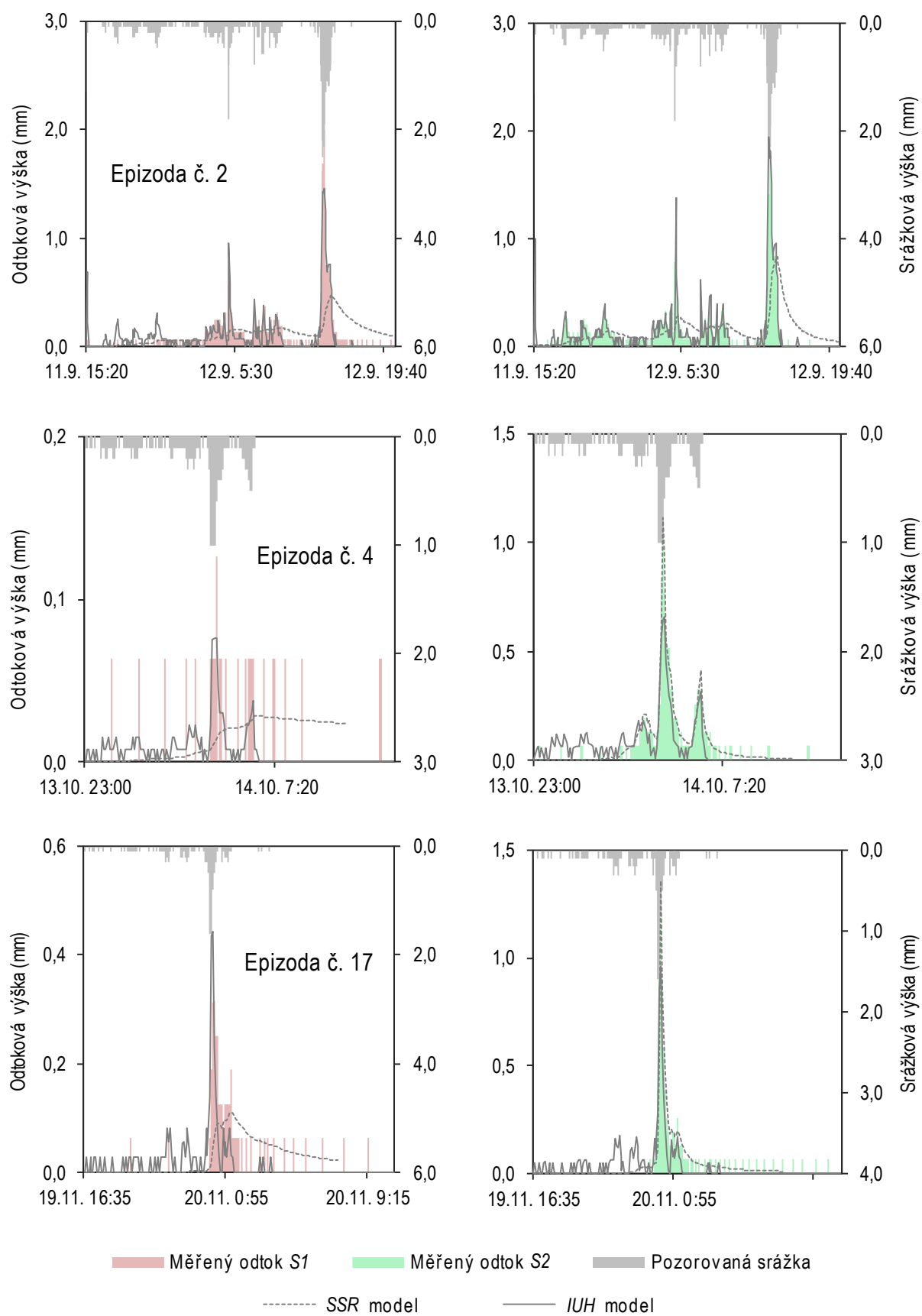
nevykazují v čase výraznější trend. Patrné také je, že oba modely počítají lépe odtok pro segment S2 než pro S1.

Nejúspěšnější byl SSR model při predikci odtoku ze segmentu S2 během epizod č. 4 a 13 ($NSE > 0,90$). IUH model dosáhl nejlepší shody vypočítaného odtoku s měřeným odtokem ze segmentu S2 u epizod č. 2, 4 a 17 ($NSE > 0,75$). Epizody č. 2, 4 a 17 jsou současně nejlépe modelovanými dle průměru NSE obou modelů. Na Obr. 7 je možno vidět hydrogramy odtoku těchto epizod s dobrou shodou mezi měřeným a vypočítaným odtokem. Další, dobře modelované epizody (č. 10, 13 a 14) jsou zobrazeny na Obr. 16 v Přílohách.

Celkový srážkový úhrn epizody č. 2 byl 51,4 mm, odtoková výška 32,2 mm ze segmentu S2 a 39,1 mm z S1, maximální 5 minut trvající intenzita deště byla 30,0 mm/h. IUH model pro segment S2 velmi dobře kopíruje měřenou odtokovou křivku, lehce pouze nadhodnotil odtok na začátku epizody a podhodnotil druhou kulminaci. SSR model selhal při popisu variability odtoku obou segmentů a značně podhodnotil oba kulminační průtoky. Selhání modelu indikují nízké NSE a také vysoké hodnoty kritéria $RMSE$ (2,33 mm pro S1, respektive 3,53 mm pro S2), které jsou nejvyššími u SSR modelu (viz Tab. 4). Vysoké hodnoty $RMSE$ se projevují při porovnání průběhů modelovaných a měřených kumulativních odtoků. Na Obr. 6 je takovéto porovnání pro epizodu č. 2. Kumulativní odtok vypočítaný SSR modelem se v každém místě odchyluje od skutečného kumulativního odtoku. Na konci epizody, kdy je měřený odtok ukončen, navíc křivka stále stoupá. Kumulativní odtok ze segmentu S1, vypočtený IUH modelem, se značně odchyluje od měřeného v prvních dvou třetinách epizody, což odpovídá podobnému $RMSE$ jako u SSR modelu (2,98 mm). Oproti tomu kumulativní odtok ze segmentu S2, vypočtený IUH modelem, se liší od měřeného zatelněji pouze na konci epizody a má tedy $RMSE$ menší (0,72 mm).



Obr. 6: Kumulativní průběhy měřené srážkové a odtokových výšek epizody č. 2 u obou segmentů v porovnání s modelovaným kumulativním odtokem.



Obr. 7: Epizody č. 2, 4 a 17 s celkově nejlépe modelovaným odtokem dle průměru NSE obou modelů.

Celkový srážkový úhrn epizody č. 4 byl 14,4 mm, odtoková výška 10,2 mm ze segmentu S2 a 1,3 mm z S1, maximální 5 minut trvající intenzita deště byla 12,0 mm/h. *IUH* model značně nadhodnotil pozvolný vzestupnou větev hydrogramu segmentu S2 a selhal při určení kulminačního odtoku. Horší odhad variability *IUH* modelem je indikován 4krát větším *RMSE* než v případě *SSR* modelu (viz Tab. 4 a Tab. 5), který pouze mírně nadhodnotil špičkový odtok. Celkově je predikce odtoku velmi dobrá. *IUH* model podhodnotil špičkový odtok pro segment S1. *SSR* model u této epizody se stanovením odtoku selhal. Dáno je to hlavně malým počtem odtokových pulzů, které se během epizody č. 4 u S1 objevily. Pro modely je takto nesouvislý odtok obtížné predikovat.

Celkový srážkový úhrn epizody č. 17 byl 13,2 mm, odtoková výška 8,7 mm ze segmentu S2 a 3,2 mm z S1, maximální 5 minut trvající intenzita deště byla 19,2 mm/h. Pro segment S2 *IUH* model podobně jako u epizody č. 4 značně nadhodnotil pozvolný nástup odtoku na začátku epizody a podhodnotil špičkový odtok. Horší odhad variability *IUH* modelem je indikován 5krát větším *RMSE* než u *SSR* modelu (při porovnání Tab. 4 a Tab. 5), který lehce nadhodnotil špičkový odtok, jinak byla jeho predikce velmi dobrá. Pro segment S1 byly oba modely podobně úspěšné. *IUH* model lépe odhadl špičkový odtok a selhal na konci epizody. *SSR* model selhal při určení vrcholu odtoku, lépe ale odhadl sestupnou čáru odtokové křivky (rozdíl je patrný u indikátoru $VE = +13\%$ u *IUH* modelu a $VE = -23\%$ u *SSR* modelu).

Epizoda č. 1 je dle modelové efektivity nejhůře odhadnutou *SSR* modelem. U *IUH* modelu je nejhůře predikovanou epizoda č. 12. Dle *RMSE* byla pro oba modely nejhůře namodelována epizoda č. 2 (na druhou stranu jedna z nejlepších dle *NSE*, viz detailní popis výše). U některých epizod nevypočetl ani jeden z modelů odtok s dostatečnou přesností. K chybám ve výpočtu odtoku dochází z různých důvodů, například nalezením pouze lokálního minima cílové funkce, které je výrazně horší než globální minimum nebo pokud není hydrogram odtoku dostatečně souvislý.

Obecně mají epizody s nižším odtokovým koeficientem u *SSR* modelu nižší míru shody měřeného odtoku s vypočítaným. Především jsou to epizody s odtokovým koeficientem menším než 0,35 (viz Tab. 1) s průměrným $NSE = 0,05$. Oproti tomu epizody s odtokovým koeficientem větším než 0,35 mají průměrně $NSE = 0,51$. Způsobeno je to pravděpodobně retenční kapacitou substrátu, která má za následek velkou transformaci menších srážkových událostí, zejména u segmentu S1. Na druhou stranu, epizody s odtokovým koeficientem menším než 0,35 produkují pouze okolo 15 % celkového ročního odtoku. Jejich hydrologický význam je tedy nízký.

Krebs et al. (2016) se potýkali se stejným problémem při modelování odtoku z testovacích segmentů zelených střech pomocí programu *SWMM LID-GR*. Jejich kritéria shody (*NSE* a *VE*) ukazují, že model funguje lépe pro srážko-odtokové epizody s vyššími odtokovými koeficienty ($> 0,50$). Menší epizody podle nich nejsou vhodné pro modelování odtoku. V jejich případě způsobují dokonce méně než 2 % pozorovaného odtoku a napadne během nich méně než 10 % srážek. Ke stejnému závěru dospěli Hakimdavar et al. (2014). Podle nich je hůře predikovatelný odtok ze zelených střech s malou záchytnou plochou (jako mají experimentální segmenty) a s menší příčinnou srážkou (a s tím souvisejícím odtokovým koeficientem, v jejich případě $< 0,50$).

Pro lepší výsledky modelu je možno rozšířit modelovou strukturu o množství vody v systému na začátku epizody (Krebs et al., 2016).

4.4. Scénář B – optimalizace souborů srážko-odtokových epizod

Parametry k a n byly alternativně optimalizovány z 8 sad rozdílných počátečních odhadů pro celé soubory epizod ve vegetační sezóny 2014 a 2015 (scénář B).

Z optimálních parametrických sad, získaných z jednotlivých počátečních odhadů, byly vybrány sady s nejvyšší hodnotou modelové efektivity NSE (Tab. 6 pro SSR model a Tab. 7 pro IUH model). Stejně jako u scénáře A, SSR model dosahuje lepších výsledků dle všech ukazatelů kvality modelu u segmentu $S2$ (2–3krát nižší $RMSE$, kladné NSE , o třetinu nižší VE). IUH model dosahuje dle NSE , $RMSE$ i VE také výrazně lepších výsledků u segmentu $S2$, které jsou ovšem oproti SSR modelu horší. Odtok ze segmentu $S1$ je predikován s přibližně stejnou úspěšností jako u SSR modelu.

Změnu koeficientů a ukazatelů kvality modelu v čase je možné sledovat v Tab. 10–Tab. 17 v Přílohách této práce. Vzhledem k tomu, že ve vegetační sezóně 2015 vegetace méně expanduje, substrát je ustálenější a kalibračních epizod je více než v sezóně 2014 lze očekávat, že budou výsledky pro sezónu 2015 lepší. Toto platí u SSR modelu pro segment $S2$ (zvýšení NSE z 0,30 na 0,66) a IUH modelu s $PO7$ (změna NSE z –6,91 na –4,86 u $S1$ a z –0,33 na –0,11 u $S2$). U výsledků SSR modelu pro segment $S1$ a ostatních výsledků IUH modelu se ovšem ukazatele kvality modelů mezi sezónami vždy zhorší. Příčinou může být obtížnost pozorování trendu mezi pouhými dvěma sezónami. Z tabulek je také patrné, že se parametry SSR modelu při zahrnutí více epizod do optimalizačního procesu stabilizují na obdobných hodnotách. Nejzřetelnější je to u segmentu $S2$, u kterého byly optimalizací zjištěny nezávisle na počátečním odhadu parametry $n_k = 2$; $k_k = 4,01E-3$ pro sezónu 2014. V případě sezóny 2015 potom optimální hodnoty $n_k = 7$ a $k_k = 6,28E-6$.

4.5. Scénář C – optimalizace souborů srážko-odtokových epizod

Nakonec byly parametry k a n optimalizovány z 8 sad rozdílných počátečních odhadů pro celé kalibrační období společně (scénář C).

Nejlepší ze sad parametrů (dle NSE) získaných z jednotlivých počátečních odhadů jsou opět v Tab. 6 pro SSR model a Tab. 7 pro IUH model. Stejně jako v přechozích scénářích, SSR model predikuje odtok ze segmentu $S2$ s dostatečnou přesností a u $S1$ selhává. IUH model selhává u obou segmentů (NSE je menší než 0). Výsledná sada parametrů pro celý kalibrační soubor u segmentu $S1$ je podle původních předpokladů podobná sadě efektivních parametrů pro vegetační sezónu 2015, která obsahuje více epizod než sezóna 2014 a navíc byl během této sezóny substrát konsolidovanější. V případě segmentu $S2$ získané výsledky předpoklad nepotvrzují, sada

parametrů pro celé kalibrační období je velmi podobná u obou modelů sadám ze sezóny 2014. Pro všechny počáteční odhady jsou koeficienty a ukazatele kvality modelů v Tab. 10–Tab. 17 v Přílohách této práce.

Tab. 6: Optimální hodnoty parametrů SSR modelu pro scénáře B a C, to znamená pro optimalizaci srážko-odtokových epizod v celých vegetačních sezónách a v celém kalibračním období. Ukázány jsou nejlepší parametry (dle NSE) získané ze všech počátečních odhadů.

	Segment S1					Segment S2				
	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	NSE (–)	RMSE (mm)	VE (%)	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	NSE (–)	RMSE (mm)	VE (%)
2014	1,00E-07	5	-0,09	1,15	61*	4,01E-03	2	0,30	1,65	35*
2015	9,10E-06	4	-0,99	2,95	205*	6,28E-06	7	0,65	1,85	30*
Celý soubor	4,87E-06	4	-0,47	2,22	134*	4,26E-03	2	0,33	1,80	36*

*Průměr je v případě VE vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 7: Optimální hodnoty parametrů IUH modelu pro scénáře B a C, to znamená pro optimalizaci srážko-odtokových epizod v celých vegetačních sezónách a v celém kalibračním období. Ukázány jsou nejlepší parametry (dle NSE) získané ze všech počátečních odhadů.

	Segment S1					Segment S2				
	k_{IUH} (min)	n_{IUH} (–)	NSE (–)	RMSE (mm)	VE (%)	k_{IUH} (min)	n_{IUH} (–)	NSE (–)	RMSE (mm)	VE (%)
2014	92,2	7	-0,24	1,87	69*	39,3	7	-0,16	5,54	50*
2015	28,5	7	-1,36	3,55	118*	15,0	5	-0,11	3,81	56*
Celý soubor	50,0	7	-0,73	3,74	109*	39,3	7	-0,16	6,57	67*

*Průměr je v případě VE vypočítán z absolutních hodnot.

4.6. Citlivost optimalizačního procesu pro různé počáteční odhady

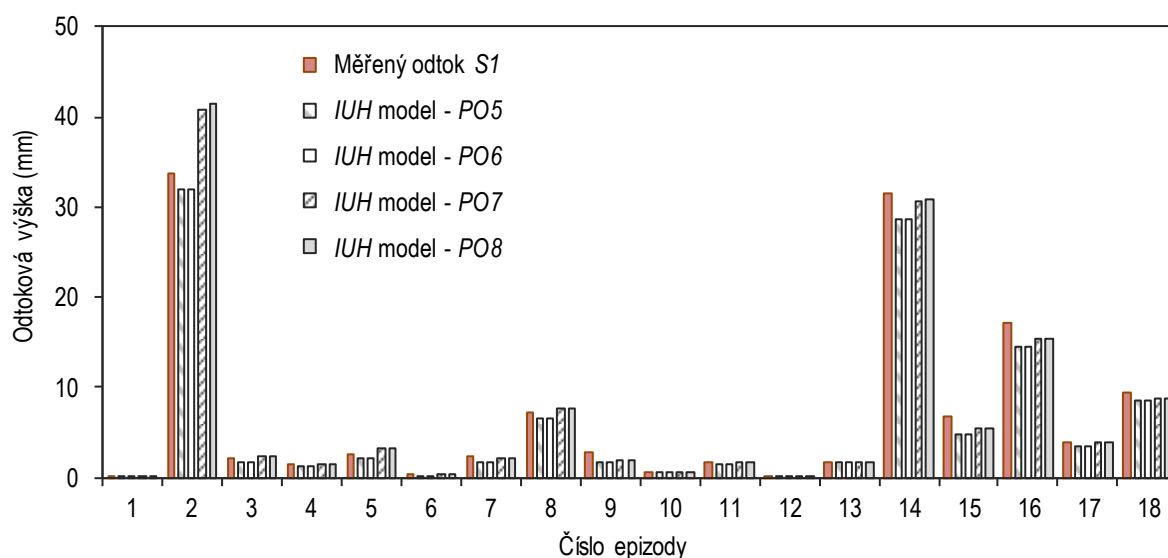
U každého z modelů bylo testováno, jak volba hodnot počátečních parametrů ovlivňuje optimalizační proces. Použity byly čtyři různé počáteční odhady pro optimalizaci parametrů SSR modelu a čtyři různé počáteční odhady pro optimalizaci IUH modelu (viz Tab. 2), podle tří scénářů (A, B a C).

Scénář A

Vzhledem k odtokovým výškám během srážko-odtokových epizod a ukazatelům kvality modelu, byly získány velmi podobné výsledky pro všechny počáteční odhady použité u obou

modelů. Například *IUH* modelem předpovídané odtokové výšky u segmentu *S1* s použitím různých počátečních odhadů (viz Obr. 8) jsou ve většině případů v poměrně úzkém rozpětí (objemová odchylka se pro jednotlivé počáteční odhady liší o méně než 15 %). Širší je tento rozptyl dosažených výsledků pouze u epizod č. 2, 3 a 5. *IUH* model nebyl schopen s žádným z testovaných počátečních odhadů vypočítat odtokovou výšku ze segmentu *S1* během epizod č. 9 a 15 s dostatečnou přesností (absolutní hodnoty *VE* mají vyšší než 15 %). U segmentu *S2* je rozpětí vypočtených hodnot kritérií užší než u *S1*. Model vždy vypočítal alespoň s jedním počátečním odhadem odtokovou výšku s dostatečnou přesností (absolutní hodnoty *VE* do 15 %). Citlivost odtokových výšek na volbu počátečního odhadu v případě *IUH* modelu a segmentu *S2* je možné nalézt na Obr. 15 v Přílohách. U každé z epizod byl zjištěn rozsah objemových odchylek, získaných pomocí jednotlivých počátečních odhadů. Tyto rozsahy v čase vykazují u obou segmentů klesající trend ($R^2 = 0,25$). Vzhledem k ukazateli *VE* se tedy výsledky optimalizace postupně stabilizují.

U *SSR* modelu nevykazují výše zmíněné rozsahy *VE* v čase znatelný trend, jsou ovšem užší než u *IUH* modelu. Oproti tomu absolutní hodnoty *VE* jsou vyšší. Citlivost odtokových výšek na počátečních odhadech pro *SSR* model je zobrazena na Obr. 13 a Obr. 14 v Přílohách.



Obr. 8: Porovnání skutečných odtokových výšek, naměřených během jednotlivých epizod u segmentu *S1* a odtokových výšek vypočítaných *IUH* modelem (s použitím *PO5*, *PO6*, *PO7* a *PO8*).

Rozdíly při použití různých počátečních odhadů jsou hlavně ve finálních optimalizovaných hodnotách parametru n_k . U některých epizod se pohybuje v celém použitém rozmezí, od 2 do 10 (epizoda č. 14 u segmentu *S2*). Parametr k_k se pohybuje v rozmezích o maximálně třech, výjimečně čtyřech řádech (například u epizody č. 5 se k_k pohybuje od $3,56E-7$ do $1,05E-3$), což vzhledem k citlivosti modelu na tento parametr není tak významné (viz kapitola 4.7).

U parametrů n_{IUH} a k_{IUH} byly zjištěny podobné rozsahy (řádově) jako u n_k a k_k . Epizod s velkými rozsahy hodnot n_{IUH} je ovšem méně a k_{IUH} se liší maximálně o dva řády v rámci jedné epizody. S ohledem na to, že parametrický prostor *IUH* modelu, v případě modelování odezvy

střešních segmentů, pravděpodobně vykazuje více lokálních minim, jsou navíc výsledné sady parametrů často blízké (v některých případech stejné) počátečním odhadům. Při volbě řádově podobných počátečních odhadů (jako je např. *PO5* a *PO6*) by byly výsledné parametry ještě bližší.

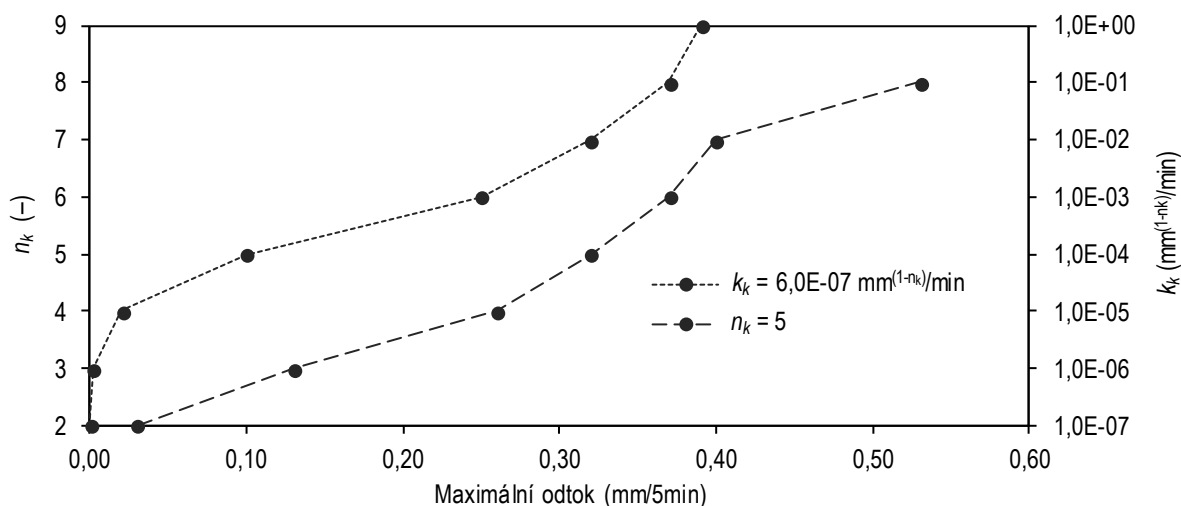
Z ukazatelů shody *SSR* modelu s měřením je patrné, že u segmentu *S1* neumožnil žádný z počátečních odhadů doputovat optimalizačnímu procesu k výrazně lepšímu výsledku. U segmentu *S2* se výrazně lepším ukázalo iterovat z *PO1* a *PO2*. U *IUH* modelu se ukázal být mírně úspěšnějším *PO1* oproti ostatním počátečním odhadům.

Scénář B

U scénáře B nebyl zjištěn výrazný rozdíl při optimalizaci parametrů k_k a n_k s různými počátečními odhady (viz Tab. 10–Tab. 17 v Přílohách). Ukazatele shody u segmentu *S1* jsou velmi podobné, parametry k_k a n_k jsou si blízké. U *S2* byly získány ze všech počátečních odhadů dokonce stejné efektivní parametry. U *IUH* modelu byla jednoznačně nejlepší sada parametrů, získaná pomocí *PO8* pro segment *S1* a pomocí *PO7* pro segment *S2*.

Scénář C

Nejlepších hodnot ukazatelů kvality (viz Tab. 10–Tab. 17 v Přílohách) bylo dosaženo při optimalizaci celého kalibračního období u *SSR* modelu pomocí *PO4* (u *S2* byly získány opět stejné výsledky pro všechny počáteční odhady), u *IUH* modelu pak pomocí *PO8* (dle *NSE*).



Obr. 9: Citlivost parametrů n_k a k_k z hlediska velikosti kulminačního odtoku epizody č. 11. Jeden z parametrů byl vždy pevně stanoven, druhý variován. Měřený kulminační odtok byl 0,39 mm/5min.

4.7. Citlivost parametrů použitých modelů

Jednoduchá citlivostní analýza byla provedena také pro parametry modelů k a n . Jeden z parametrů modelu byl při výpočtu odtoku ze segmentu *S2* během epizody č. 11 vždy pevně

stanoven, druhý byl následovně měněn (n_k a n_{IUH} od 2 do 9; k_k od 0,1 do $1,0E-07 \text{ mm}^{(1-n_k)}/\text{min}$ a k_{IUH} od 0,1 do 35 min). Sledován byl vliv změny jednoho z parametrů na velikost kulminačního odtoku. V případě SSR modelu rozhoduje o znatelnější změně kulminačního průtoku (o přibližně 0,05 mm/5min), zvýšení parametru n_k o jednotky, zatímco v případě parametru k_k až celé řády (přibližně shodné změny je dosaženo při snížení nebo zvýšení n_k o 1 a k_k 10–50krát, viz Obr. 9). Citlivějším parametrem SSR modelu je tedy z hlediska velikosti kulminačního odtoku n_k .

U IUH modelu hodnota kulminačního odtoku nejdříve roste se zvyšující se hodnotou parametrů (s $n_{IUH} = (2;5)$ a $k_{IUH} = (0;5)$) a následně klesá. Citlivostní analýza modelů promítnutá do hodnot kulminačního odtoku je na Obr. 12 v Přílohách. Z analýzy vyplývá, že z hlediska velikosti kulminačního odtoku je citlivějším parametrem IUH modelu n_{IUH} .

4.8. Validace modelu pro vybrané optimální parametrické sady

Pro sady parametrů, s nimiž dosáhly SSR a IUH modely nejlepších hodnot kritérií shody (viz Tab. 6 a Tab. 7 – scénáře B a C) byla provedena validace na celém souboru epizod z let 2016 a 2017. V Tab. 8 jsou porovnány ukazatele shody NSE a VE (RMSE není ukázáno), které generují tyto sady parametrů SSR modelu v jednotlivých kalibračních obdobích, respektive v celém validačním období. V Tab. 9 je stejné srovnání ukazatelů shody pro IUH model.

Optimální efektivní sady parametrů, získané při scénářích B a C, dovedly SSR model (Tab. 8) podle očekávání k horším ukazatelům kvality modelu. U segmentu S1 se modelová efektivita zvýšila přibližně 2,5krát a objem odtoku 2krát, pro každou použitou sadu parametrů. Efektivními parametry, pomocí kterých lze získat nejlepší výsledky modelu pro validační období, zůstaly $n_k = 5$ a $k_k = 1,00E-07 \text{ mm}^{(1-n_k)}/\text{min}$, získané kalibrační parametry sezóny 2014 při scénáři B. U segmentu S2 došlo k výraznějšímu zhoršení ukazatelů kvality modelu než u segmentu S1. Nejlepší sadou parametrů u segmentu S2 je také sada získaná kalibrační parametry sezóny 2014 při scénáři B ($n_k = 2$ a $k_k = 4,01E-03 \text{ mm}^{(1-n_k)}/\text{min}$).

Tab. 8: Srovnání ukazatelů kvality modelu (modelové efektivity a objemové odchylky) pro celé validační a celé kalibrační období. K ukazatelům došel SSR model při použití nejlepších sad parametrů získaných optimalizací při Scénáři B a C.

Efektivní kalibrační sada parametrů pro	Segment S1				Segment S2			
	Kalibrační období		Celé validační období		Kalibrační období		Celé validační období	
	NSE	VE	NSE	VE	NSE	VE	NSE	VE
	(–)	(%)	(–)	(%)	(–)	(%)	(–)	(%)
2014	-0,09	61*	-0,24	122*	0,30	35*	-0,34	145*
2015	-0,99	205*	-2,45	418*	0,65	30*	-572,21	370*
Celý soubor	-0,47	134*	-1,29	297*	0,33	36*	-0,37	148*

*Průměr je v případě VE vypočítán z absolutních hodnot.

Obecně se ukazatele kvality modelu výrazně zhoršily (zejména u optimální sady parametrů ze sezóny 2015 u segmentu S2). *NSE* se zápornými hodnotami a několikanásobné *VE* oproti kalibračnímu období značí, že žádná ze sad efektivních parametrů z kalibrace není bez úprav použitelná pro validační období. Optimální efektivní parametry z kalibrace *SSR* modelu tedy nejsou přenositelné z žádného scénáře bez ztráty úspěšnosti modelu. Způsobeno je to pravděpodobně změnami v systému segmentů (sedáním substrátu, rozrůstáním vegetace, prorůstáním ochranné vrstvy kořeny apod.), kvůli kterým se v čase mění odtokové poměry segmentů.

Tab. 9: Srovnání ukazatelů kvality modelu (modelové efektivity a objemové odchylky) pro celé validační a celé kalibrační období. K ukazatelům došel *IUH* model při použití nejlepších sad parametrů získaných optimalizací při Scénáři B a C.

Efektivní kalibrační sada parametrů pro	Segment S1				Segment S2			
	Kalibrační období		Celé validační období		Kalibrační období		Celé validační období	
	<i>NSE</i>	<i>VE</i>	<i>NSE</i>	<i>VE</i>	<i>NSE</i>	<i>VE</i>	<i>NSE</i>	<i>VE</i>
	(–)	(%)	(–)	(%)	(–)	(%)	(–)	(%)
2014	-0,24	69*	-0,11	85*	-0,11	56*	-0,55	88*
2015	-1,36	118*	-0,71	111*	-0,16	50*	-3,57	183*
Celý soubor	-0,73	109*	-0,18	73*	-0,16	67*	-0,55	88*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

U *IUH* modelu (Tab. 9) došlo při přenesení efektivních parametrů segment *S1* z kalibračních období do celého validačního období k mírnému zlepšení ukazatelů shody modelu s měřením. *NSE* se zlepšilo o přibližně 50 %, *VE* zůstalo řádově podobné. Efektivní parametry $n_{IUH} = 7$ a $k_{IUH} = 92,2$ min, vedoucí k nejlepším hodnotám ukazatelů kvality modelu u segmentu *S1*, jsou stejně jako u *SSR* modelu z kalibrace efektivních parametrů pro sezónu 2014. Parametry *IUH* modelu pro segment *S1* mají tedy lepší přenositelnost pro předpověď oproti *SSR* modelu. *SSR* model zase na druhou stranu umožňuje dosáhnout kalibrací lepší shody s měřením.

U segmentu *S2* došlo naopak ke zhoršení ukazatelů kvality modelu. Nejúspěšnějšími efektivními parametry zůstaly $n_{IUH} = 7$ a $k_{IUH} = 39,3$ min z kalibrace sezóny 2014 a obou kalibračních sezón najednou (scénář B a C).

Navzdory změnám v segmentech, popsaným výše, došly modely k nejlepším shodám měřeného a vypočítaného odtoku v kalibrační sezóně 2014 a následně s efektivními parametry, vedoucími k těmto shodám, také ve validačním období. Způsobeno to může být volbou počátečních parametrů, které modely nedovedly k lepším výsledkům ve vegetační sezóně 2015. Validace by dle kapitol 3.8. a 4.2. neměla být ovlivněna rozdílným charakterem srážkových epizod v kalibračním a validačním období.

5. Závěr

Pro účely této práce byly vybrány dva konceptuální modely, vhodné k predikci odtoku ze zelených střech – model na principu okamžitého jednotkového hydrogramu a model na bázi nelineárního rezervoáru. Pro kalibraci a validaci modelů byla použita měření srážkové a odtokové výšky z vegetačních sezón 2014 až 2017 ze dvou testovacích segmentů zelených střech (S1 a S2), umístěných na střeše budovy UCEEB v Buštěhradu.

Segment S1 obsahuje málo propustný substrát typu Technosol, segment S2 pak lehký komerční substrát. Odtokové koeficienty obou segmentů vykazují v čase klesající trend. Způsobeno je to především zvyšující se pokryvností vegetace, konsolidací půdy a prorůstáním kořenovým systémem rostlin přes ochrannou geotextilii do drenážní vrstvy.

Zjištěna byla také vysoká závislost odtokové výšky segmentu S2 na srážkové výšce ($R^2 > 0,93$) po rozdělení epizod do tříd podle počátečního vlhkostního stavu segmentu. Počáteční vlhkost přirozeně ovlivňuje odtok během epizod s menšími srážkovými úhrny (pod 7 mm) výrazně více než vydatnější epizody (nad 40 mm). Vysoká závislost srážkové a odtokové výšky v této a dalších publikovaných pracích značí možnost jejího uplatnění při odhadu objemu odtoku ze zelených střech.

Odtok byl počítán epizodicky (během epizod větších než 6 mm), evapotranspirace byla zanedbána. Použitý datový soubor neobsahuje epizody s dobou opakování delší než 1 rok, s výjimkou jedné epizody z roku 2016 s dobou opakování 7 let. Vliv výskytu (ale také absence) extrémních událostí na proces modelování proto nemohl být studován. Pro posouzení shody modelu s měřením byla použita modelová efektivita, zobecněná směrodatná odchylka a objemová odchylka.

Parametry obou modelů byly optimalizovány s použitím daných omezení tak, aby odezva modelů co nejlépe odpovídala měřeným odtokům. Alternativně byly hledány efektivní sady parametrů pro celé sezóny. Sledován byl vliv volby počátečních parametrů na konečném výsledku modelu.

Použití modelu na bázi jednoduchého nelineárního rezervoáru (SSR modelu) se zdá být vhodné pro srážko-odtokové epizody s odtokovým koeficientem větším než 0,35, u nichž byla optimalizací parametrů získána průměrná hodnota modelové efektivitě 0,51. U epizod s menším odtokovým koeficientem bylo dosaženo modelové efektivitě 0,05. Objemová odchylka vypočítaného odtoku nepřesáhla u valné většiny epizod 25 %.

Výsledky okamžitého jednotkového hydrogramu (IUH modelu) byly z hlediska modelové efektivitě horší než v předchozím případě u obou segmentů. Na druhou stranu, objem odtoku vypočítaný modelem, se lišil od skutečného v průměru pouze o 7 %. Ve 32 případech z 36 byl objem odtoku nadhodnocen. U epizod s odtokovými koeficienty vyššími než 0,35 bylo dosaženo lepších výsledků oproti epizodám s menšími odtokovými koeficienty, stejně jako u SSR modelu. Význam epizod s odtokovým koeficientem menším než 0,35 je ovšem z hydrologického hlediska

malý. *IUH* model je také schopen lépe napodobit rychlé změny hydrogramů. Nejlépe modelovaným byl, dle průměru *NSE* obou modelů, odtok během epizod č. 2, 4 a 17.

Získané efektivní parametry pro celé vegetační sezóny a celé kalibrační období neposkytly akceptovatelné výsledky, s výjimkou efektivních parametrů *SSR* modelu z vegetační sezóny 2015 pro segment *S2* s propustnějším substrátem ($n_k = 7$ a $k_k = 6,28E-06 \text{ mm}^{(1-n_k)}/\text{min}$, modelová efektivita 0,65). Celkově dosáhl *SSR* model mírně lepších výsledků než *IUH* model.

Meziročně nebylo sledováno jasné zlepšení kritérií shody. U obou modelů při modelování odtoku ze segmentu *S2* se hodnoty kritérií shody zlepšily vždy v roce 2015 oproti roku 2014. Tuto skutečnost ovšem nelze považovat za trend vzhledem ke krátké analyzované časové řadě.

Celkově, *SSR* model byl méně náročným na implementaci a jeho optimalizované parametry umožnily lepší kritéria shody. Model je vzhledem k těmto skutečnostem vhodnějším k modelování odtoku ze zelených střech.

Pro všechny počáteční odhady použité u obou modelů byly získány velmi podobné výsledky, vzhledem k odtokovým výškám, naměřeným během epizod, a kritériím shody modelu. Objemová odchylka, získaná optimalizací z jednoho počátečního odhadu, je vždy maximálně o 15 % vyšší nebo nižší než objemová odchylka získaná optimalizací z jiného počátečního odhadu v rámci jedné epizody. Tyto rozsahy se navíc v čase zužují a značí tak stabilizaci optimalizačního procesu. Rozdíly při použití různých počátečních odhadů jsou hlavně ve finálních optimalizovaných hodnotách parametrů n_k a n_{IUH} (pohybujících se v celém použitém rozmezí od 2 do 10).

Pro optimální parametry epizod z vegetačních sezón 2014 a 2015 a celého kalibračního období byla provedena validace na epizodách ze sezón 2016 a 2017. Srážkové epizody z kalibračního období byly podobného charakteru jako epizody z validačního období. Soubory se liší pouze tím, že ve validačním období chybí epizody se srážkovým úhrnem větším než 30 mm, které jsou v kalibračním období dvě a epizoda č. 20, má oproti ostatním výraznou maximální intenzitu 122,4 mm/hod.

Kritéria shody ukázala, že kromě sad parametrů *IUH* modelu u segmentu *S1*, žádné další sady efektivních parametrů z kalibrace nezlepší výsledky modelu ve validačním období. Způsobeno je to pravděpodobně změnami segmentů v čase (sedáním substrátu, rozrůstáním vegetace, prorůstáním ochranné vrstvy kořeny apod.) a s tím související potřebnou změnou parametrů modelů mezi sezónami.

Validace také prokázala, že parametry *IUH* modelu mají mírně lepší přenositelnost pro předpověď oproti *SSR* modelu. Ten zase umožňuje kalibraci na lepší shodu s měřením než *IUH* model. K nejlepším shodám měřeného a vypočítaného odtoku ve validačním období doputovaly oba modely pomocí parametrů z kalibrační sezóny 2014.

6. Seznam použité literatury

- Carson, T. B., Marasco, D. E., Culligan, P. J., McGillis, W. R., 2013. "Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three, full scale systems." *Environmental Research Letters* 8: 2. DOI:10.1088/1748-9326/8/2/024036
- Fylstra, D., Lasdon, L., Watson, J., 1998. "Design and Use of the Microsoft Excel Solver." *Journal Interfaces* 28: 29-55. DOI:10.1287/inte.28.5.29
- Hakimdavar, R., Culligan, P. J., Finazzi, M., Barontini, S., Ranzi, R., 2014. "Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance." *Ecological Engineering* 73: 494–508. DOI:10.1016/j.ecoleng.2014.09.080
- Jelínková, V., Dohnal, M., Pícek, T., 2015. "A Green Roof Segment for Monitoring the Hydrological and Thermal Behaviour of Anthropogenic Soil Systems." *Soil and Water Research* 10: 262–270. DOI:10.17221/17/2015-SWR
- Jelínková, V., Šácha, J., Dohnal, M., Skala, V., 2016. "Thermal and water regime studied in a thin soil layer of green roof systems at early stage of pedogenesis." *Journal of Soils and Sediments* 16 (11): 2568–2579. DOI:10.1007/s11368-016-1457-7
- Kasmin, H., Stovin, V., Hathway, E.A., 2010. "Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs." *Water Science and Technology* 62 (4): 898–905. DOI:10.2166/wst.2010.352
- Kemel, M., 2000. "Klimatologie, meteorologie, hydrologie" *Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT v Praze*.
- Krebs, G., Kuoppamäki, K., Kokkonen, T., Koivusalo, H., 2016. "Simulation of green roof test bed runoff." *Hydrological Processes* 30: 250–262. DOI: 10.1002/hyp.10605
- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P.S., Arnbjerg-Nielsen, K., Jensen, M. B., Binning, P. J., 2014. "Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications." *Journal of Hydrology* 519: 3237–3248. DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.10.030
- Mobilia, M., Longobardi, A., Sartor, J. F., 2014. "Impact of green roofs on stormwater runoff coefficients in a Mediterranean urban environment." *Proceeding of the 5th International Conference on Urban Sustainability, Cultural Sustainability, Green Development, Green Structures and Clean Cars (USCUDAR '14)*, Florence, Italy, November 22–24, 2014: 100–106.
- Morgan, S., Celik, S., Retzlaff, W., 2013. "Green roof storm-water runoff quantity and quality." *J. Environ. Eng.* 139: 471–478. DOI:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589
- Nash, J.E., 1957. "The form of the instantaneous unit hydrograph." *International Association of Hydrological Sciences General Assembly* 1957: 114–121
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. "River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles." *Journal of Hydrology* 10 (3): 282–290. DOI:10.1016/0022-1694(70)90255-6

- Němec, J., 1965. "Hydrologie." *Státní nakladatelství technické literatury*, Praha.
- Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L.G., 2012. "Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof." *Hydrological Processes* 26: 73–84. DOI:10.1002/hyp.8112
- Skala, V., 2016. "Odtokové poměry zelených střech" *Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT*. Bakalářská práce.
- Stovin, V., Vesuviano, G., Kasim, H., 2012. "The hydrological performance of green roof test bed under UK climatic conditions." *Journal of Hydrology* 414–415: 148–161. DOI:10.1016/j.jhydrol.2011.10.022
- Vesuviano, G., Sonnenwald, F., Stovin, V., 2014. "A two-stage storage routing model for green roof runoff detention." *Water Science and Technology* 69 (6): 1191–7. DOI:10.2166/wst.2013.808
- Yang, W., Li, D., Sun, T., Ni, G., 2015. "Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs." *Ecological Engineering* 74: 327–336. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.023
- Zimmer, U., Geiger, W. F., 1997. "Model for design of multi-layered infiltration systems." *Water Science and Technology* 36 (8–9): 301–306. DOI:10.1016/S0273-1223(97)00582-9

7. Seznam obrázků

Obr. 1: Snímky dvou testovacích segmentů <i>S1</i> (vlevo) a <i>S2</i> (vpravo) na střeše budovy UCEEB v Buštěhradu (pořízeny Bc. Jitkou Hanzlíkovou 30. srpna 2017).....	13
Obr. 2: Příklad výpočtu odtoku <i>IUH</i> modelem. Každý se srážkových pulzů je převeden transformační funkcí na dílčí odtokovou křivku. Následně jsou hodnoty dílčích křivek v každém časovém kroku sečteny a vzniká tak celkový odtok.	18
Obr. 3: Kořenový systém rostlin prorůstající přes ochranu geotextílii do nopové fólie segmentu <i>S1</i> (vlevo) a segmentu <i>S2</i> (vpravo). Snímky byly pořízeny Bc. Jitkou Hanzlíkovou 30. srpna 2017 během výměny substrátu a vegetace.	22
Obr. 4: Lineární závislost srážkové a odtokové výšky naměřených během epizod č. 12 až 30 u segmentu <i>S2</i> , rozdělených do tří tříd podle počátečního vlhkostního stavu θ_0 . Obrysem jsou označeny epizody s odtokovým koeficient větším než 0,98. Čerchované čáry vyjadřují spojnice shodných hodnot odtokových koeficientů.	23
Obr. 5: <i>IDF</i> křivky pro Kladno dle Němce v porovnání s maximálními srážkovými intenzitami dešťů v celém použitém datovém souboru s dobou trvání 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90 a 120 minut.	24
Obr. 6: Kumulativní průběhy měřené srážkové a odtokové výšek epizody č. 2 u obou segmentů v porovnání s modelovaným kumulativním odtokem.....	27
Obr. 7: Epizody č. 2, 4 a 17 s celkově nejlépe modelovaným odtokem dle průměru <i>NSE</i> obou modelů.....	28
Obr. 8: Porovnání skutečných odtokových výšek, naměřených během jednotlivých epizod u segmentu <i>S1</i> a odtokových výšek vypočítaných <i>IUH</i> modelem (s použitím <i>PO5</i> , <i>PO6</i> , <i>PO7</i> a <i>PO8</i>).	32
Obr. 9: Citlivost parametrů n_k a k_k z hlediska velikosti kulminačního odtoku epizody č. 11. Jeden z parametrů byl vždy pevně stanoven, druhý variován. Měřený kulminační odtok byl 0,39 mm/5min.	33
Obr. 10: Kumulativní srážková výška a odtokové výšky segmentů <i>S1</i> a <i>S2</i> v jednotlivých vegetačních sezónách z let 2014 až 2017.	44
Obr. 11: Z aproximací dvou počátečních vlhkostních stavů $\theta_0 = 20\text{--}55\%$ a $\theta_0 = 0\text{--}20\%$ byly vypočítány odtokové výšky, zapříčiněné zvolenými srážkovými výškami. Na obrázku je vykreslen procentuální rozdíl vypočtených odtokových výšek těchto tříd. Odtok ze segmentu s vlhkostním stavem $\theta_0 = 20\text{--}55\%$ je vždy alespoň o 4 % vyšší než se sušším vlhkostním stavem.	45
Obr. 12: Citlivost parametrů n_{IUH} a k_{IUH} z hlediska velikosti kulminačního odtoku epizody č. 11. Jeden z parametrů byl vždy pevně stanoven, druhý variován. Měřený kulminační odtok byl 0,39 mm/5min.....	45
Obr. 13: Porovnání skutečných a vypočítaných odtokových výšek (s použitím <i>PO1</i> , <i>PO2</i> , <i>PO3</i> a <i>PO4</i>) pro jednotlivé epizody <i>SSR</i> modelem. Odtok byl naměřen ze segmentu <i>S2</i>	54

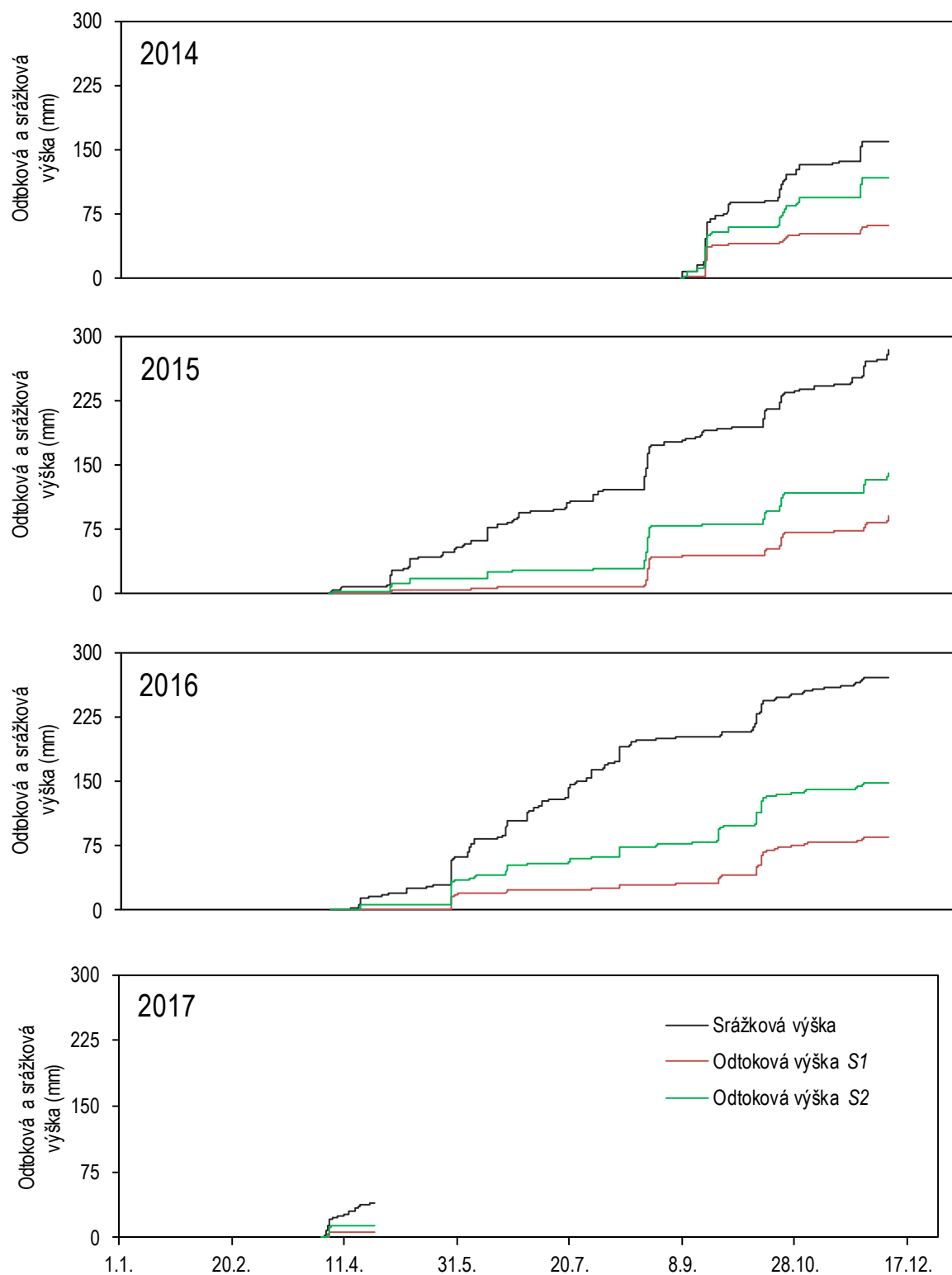
Obr. 14: Porovnání skutečných a vypočítaných odtokových výšek (s použitím <i>PO1</i> , <i>PO2</i> , <i>PO3</i> a <i>PO4</i>) pro jednotlivé epizody <i>SSR</i> modelem. Odtok byl naměřen ze segmentu <i>S1</i>	54
Obr. 15: Porovnání skutečných a vypočítaných odtokových výšek (s použitím <i>PO5</i> , <i>PO6</i> , <i>PO7</i> a <i>PO8</i>) pro jednotlivé epizody <i>IUH</i> modelem. Odtok byl naměřen ze segmentu <i>S2</i>	54
Obr. 16: Epizody č. 10, 13 a 14 s dostatečně přesně modelovaným odtokem dle průměru <i>NSE</i> obou modelů.....	55

8. Seznam tabulek

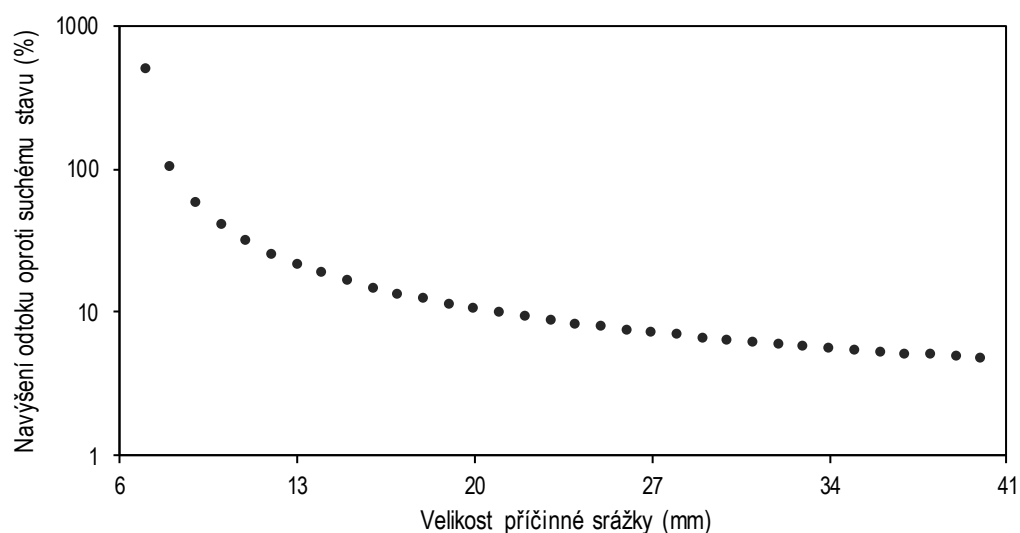
Tab. 1: Základní parametry srážko-odtokových epizod, použitých k modelování odtoku ze segmentů zelených střech <i>S1</i> a <i>S2</i> . Epizody z let 2014 a 2015 byly použity pro kalibraci modelu, epizody z let 2016 a 2017 pro jeho validaci. Během epizod č. 14,16, 29 a 30, kdy byl zjištěn odtokový koeficient $> 0,98$, je stanovení odtokové výšky ovlivněno selháním měření nebo jinými měřičskými nejistotami. Možné příčiny jsou diskutovány v kapitole 4.1.	15
Tab. 2: Seznam počátečních odhadů parametrů pro <i>SSR</i> model (k_k a n_k), a <i>IUH</i> model (k_{IUH} a n_{IUH}).	18
Tab. 3: Srážkový úhrn a odtokové výšky segmentů <i>S1</i> a <i>S2</i> ve vegetačních sezónách s příslušnými odtokovými koeficienty. Vzhledem k rozdílnému trvání vegetačních sezón (zahrnujících rozdílná roční období), nelze porovnávat srážkové a odtokové úhrny mezi sebou.	21
Tab. 4: Optimální hodnoty parametrů v případě <i>SSR</i> modelu a scénáře A. Vybrány jsou nejlepší optimální parametrické sady (dle modelové efektivity <i>NSE</i>) ze všech 4 sad počátečních odhadů. Uvedeny jsou také příslušné hodnoty kvality shody modelu s měřením (<i>RMSE</i> , <i>NSE</i> a <i>VE</i>).	25
Tab. 5: Optimální hodnoty parametrů v případě <i>IUH</i> modelu a scénáře A. Vybrány jsou nejlepší optimální parametrické sady (dle modelové efektivity <i>NSE</i>) ze všech 4 sad počátečních odhadů. Uvedeny jsou také příslušné hodnoty kvality shody modelu s měřením (<i>RMSE</i> , <i>NSE</i> a <i>VE</i>).	26
Tab. 6: Optimální hodnoty parametrů <i>SSR</i> modelu pro scénáře B a C, to znamená pro optimalizaci srážko-odtokových epizod v celých vegetačních sezónách a v celém kalibračním období. Ukázány jsou nejlepší parametry (dle <i>NSE</i>) získané ze všech počátečních odhadů.	31
Tab. 7: Optimální hodnoty parametrů <i>IUH</i> modelu pro scénáře B a C, to znamená pro optimalizaci srážko-odtokových epizod v celých vegetačních sezónách a v celém kalibračním období. Ukázány jsou nejlepší parametry (dle <i>NSE</i>) získané ze všech počátečních odhadů.	31
Tab. 8: Srovnání ukazatelů kvality modelu (modelové efektivity a objemové odchylky) pro celé validační a celé kalibrační období. K ukazatelům došel <i>SSR</i> model při použití nejlepších sad parametrů získaných optimalizací při Scénáři B a C.	34
Tab. 9: Srovnání ukazatelů kvality modelu (modelové efektivity a objemové odchylky) pro celé validační a celé kalibrační období. K ukazatelům došel <i>IUH</i> model při použití nejlepších sad parametrů získaných optimalizací při Scénáři B a C.	35
Tab. 10: Optimální hodnoty parametrů <i>SSR</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z <i>PO1</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i>	46
Tab. 11: Optimální hodnoty parametrů <i>SSR</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní	

tabulka) získané z <i>PO2</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i> .	47
Tab. 12: Optimální hodnoty parametrů <i>SSR</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z <i>PO3</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i> .	48
Tab. 13: Optimální hodnoty parametrů <i>SSR</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z <i>PO4</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i> .	49
Tab. 14: Optimální hodnoty parametrů <i>IUH</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z <i>PO5</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i> .	50
Tab. 15: Optimální hodnoty parametrů <i>IUH</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z <i>PO6</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i> .	51
Tab. 16: Optimální hodnoty parametrů <i>IUH</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z <i>PO7</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i> .	52
Tab. 17: Optimální hodnoty parametrů <i>IUH</i> modelu pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z <i>PO8</i> . Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností <i>NSE</i> , <i>RMSE</i> a <i>VE</i> .	53

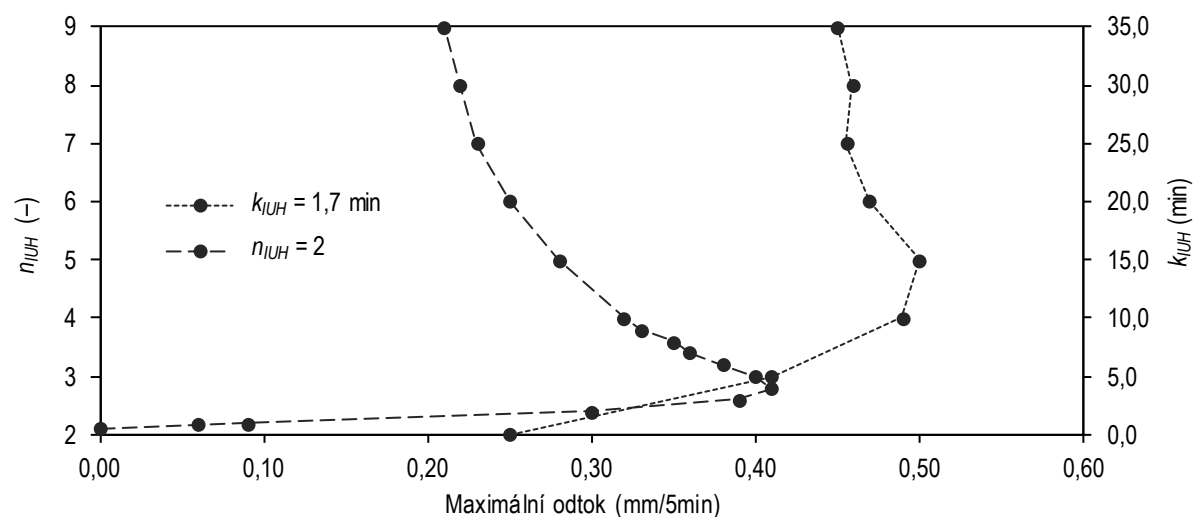
9. Přílohy



Obr. 10: Kumulativní srážková výška a odtokové výšky segmentů S1 a S2 v jednotlivých vegetačních sezónách z let 2014 až 2017.



Obr. 11: Z aproximací dvou počátečních vlhkostních stavů $\theta_0 = 20\text{--}55\%$ a $\theta_0 = 0\text{--}20\%$ byly vypočítány odtokové výšky, zapříčiněné zvolenými srážkovými výškami. Na obrázku je vykreslen procentuální rozdíl vypočtených odtokových výšek těchto tříd. Otok ze segmentu s vlhkostním stavem $\theta_0 = 20\text{--}55\%$ je vždy alespoň o 4 % vyšší než se sušším vlhkostním stavem.



Obr. 12: Citlivost parametrů n_{IUH} a k_{IUH} z hlediska velikosti kulminačního odtoku epizody č. 11. Jeden z parametrů byl vždy pevně stanoven, druhý variován. Měřený kulminační odtok byl 0,39 mm/5min.

Tab. 10: Optimální hodnoty parametrů **SSR modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **PO1**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>
	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)
1	1,71E-06	4	-0,03	0,11	-50	1,93E-07	10	-2,30	0,29	-14
2	6,78E-04	2	0,10	2,33	-19	2,93E-03	2	0,16	3,53	-22
3	2,58E-04	2	-0,01	0,39	-28	1,13E-06	6	0,27	1,17	-24
4	1,48E-04	2	-0,07	0,26	-39	1,31E-06	7	0,87	0,28	-6
5	1,05E-03	2	0,06	0,36	-24	1,61E-03	6	0,86	0,12	-1
6	4,19E-06	4	-0,03	0,10	-40	3,18E-07	8	0,49	0,29	-18
7	1,52E-05	5	0,02	0,23	-8	3,96E-02	2	0,68	0,10	3
8	5,44E-07	4	-0,17	1,25	-25	7,36E-03	2	0,71	0,50	2
9	2,86E-07	4	0,08	0,47	11	2,73E-07	6	0,20	1,13	-14
10	1,08E-04	2	-0,13	0,14	-49	2,76E-07	7	0,77	0,33	-13
11	1,38E-04	2	0,01	0,27	-33	5,74E-07	6	0,78	0,51	-12
12	9,71E-05	2	-0,02	0,05	-48	1,28E-06	7	0,28	0,39	-26
13	1,03E-04	2	-0,04	0,71	-47	4,05E-07	7	0,84	0,61	-8
14	6,65E-07	7	0,49	0,84	1	4,57E-01	2	0,52	0,83	6
15	6,99E-07	4	0,12	0,29	-7	1,03E-06	7	0,70	0,40	-2
16	1,17E-04	4	0,41	1,10	8	7,75E-03	2	0,46	1,44	9
17	5,18E-04	2	0,21	0,62	-33	4,01E-07	7	0,83	0,25	-4
18	8,95E-07	9	0,46	0,07	-2	6,25E-06	7	0,32	0,21	-3
Průměr	1,80E-04	4	0,08	0,53	26*	2,87E-02	6	0,41	0,69	10*

	Segment S1					Segment S2				
	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>
	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)
2014	1,63E-06	4	-0,11	1,16	58*	4,01E-03	2	0,30	1,65	35*
2015	6,64E-04	2	-1,04	2,87	253*	6,27E-06	7	0,66	1,85	30*
Celý soubor	5,44E-04	2	-0,70	2,26	218*	4,26E-03	2	0,33	1,80	36*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 11: Optimální hodnoty parametrů **SSR modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **P02**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	1,05E-05	3	-0,03	0,10	-49	5,34E-07	9	-0,49	0,35	-13
2	6,78E-04	2	0,10	2,33	-19	2,93E-03	2	0,16	3,53	-22
3	2,58E-04	2	-0,01	0,39	-28	1,00E-07	7	0,24	1,19	-14
4	9,41E-07	4	-0,18	0,32	-40	1,31E-06	7	0,87	0,28	-6
5	3,56E-07	7	-0,05	0,55	-30	1,61E-03	6	0,86	0,12	-1
6	1,00E-07	6	-0,02	0,12	-16	1,00E-07	9	0,56	0,28	-21
7	1,00E-07	9	-0,13	0,31	-15	3,96E-02	2	0,68	0,10	3
8	6,15E-07	4	-0,19	1,22	-31	7,36E-03	2	0,71	0,50	2
9	5,41E-06	3	0,07	0,26	-12	1,08E-07	7	0,41	1,35	-22
10	1,00E-07	5	-0,15	0,17	-26	1,76E-06	6	0,73	0,38	-16
11	9,98E-07	4	-0,03	0,33	-35	6,46E-07	6	0,79	0,50	-13
12	1,67E-05	3	-0,03	0,05	-48	1,00E-07	9	0,42	0,39	-32
13	1,03E-04	2	-0,04	0,71	-47	4,05E-07	7	0,84	0,61	-8
14	5,91E-07	7	0,49	0,84	2	4,57E-01	2	0,52	0,83	6
15	6,99E-07	4	0,12	0,29	-7	2,24E-07	8	0,72	0,36	-2
16	1,00E-07	9	0,45	1,20	12	7,75E-03	2	0,46	1,44	9
17	5,18E-07	5	0,32	0,57	-27	3,75E-07	7	0,82	0,25	-3
18	8,95E-07	9	0,46	0,07	-2	1,89E-06	8	0,32	0,21	-2
Průměr	5,99E-05	5	0,07	0,55	25*	2,87E-02	6	0,53	0,70	11*

	Segment S1					Segment S2				
	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
2014	2,61E-05	3	-0,17	1,23	89*	4,01E-03	2	0,30	1,65	35*
2015	6,64E-04	2	-1,04	2,87	253*	6,27E-06	7	0,66	1,85	30*
Celý soubor	5,44E-04	2	-0,70	2,26	218*	4,26E-03	2	0,33	1,80	36*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 12: Optimální hodnoty parametrů **SSR modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **PO3**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>
	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)
1	6,40E-05	2	-0,03	0,10	-48	1,93E-07	10	-2,31	0,29	-14
2	6,78E-04	2	0,10	2,33	-19	2,93E-03	2	0,16	3,53	-22
3	2,58E-04	2	-0,01	0,39	-28	1,23E-07	7	0,26	1,13	-17
4	1,48E-04	2	-0,07	0,26	-39	1,00E-07	9	0,94	0,35	-7
5	1,05E-03	2	0,06	0,36	-24	1,61E-03	6	0,86	0,12	-1
6	1,43E-04	2	-0,02	0,10	-45	1,00E-07	9	0,56	0,28	-21
7	1,14E-03	2	0,09	0,20	-14	3,96E-02	2	0,68	0,10	3
8	1,27E-04	2	-0,08	1,02	-25	7,36E-03	2	0,71	0,50	2
9	5,41E-06	3	0,07	0,26	-12	1,00E-07	7	0,40	1,31	-22
10	1,08E-04	2	-0,13	0,14	-49	1,06E-07	8	0,89	0,45	-22
11	1,38E-04	2	0,01	0,27	-33	1,10E-07	7	0,84	0,46	-14
12	9,71E-05	2	-0,02	0,05	-48	1,00E-07	9	0,42	0,39	-32
13	1,03E-04	2	-0,04	0,71	-47	1,00E-07	8	0,95	0,55	-9
14	1,12E-07	8	0,51	0,83	2	2,44E-02	9	-4,73	0,85	6
15	9,17E-06	3	0,11	0,28	-5	1,00E-07	9	0,75	0,46	-4
16	1,17E-04	4	0,41	1,10	8	7,75E-03	2	0,46	1,44	9
17	5,18E-04	2	0,21	0,62	-33	1,00E-07	8	0,86	0,26	-5
18	2,65E-07	10	0,46	0,08	-1	6,11E-06	7	0,32	0,21	-3
Průměr	2,61E-04	3	0,09	0,51	27*	4,64E-03	7	0,17	0,70	12*

	Segment S1					Segment S2				
	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>	k_k	n_k	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>VE</i>
	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)	(mm ^(1-nk) /min)	(–)	(–)	(mm)	(%)
2014	1,76E-06	4	-0,13	1,16	60*	4,01E-03	2	0,30	1,65	35*
2015	6,64E-04	2	-1,04	2,87	253*	6,29E-06	7	0,65	1,85	30*
Celý soubor	5,09E-05	3	-0,52	2,21	164*	4,26E-03	2	0,33	1,80	36*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 13: Optimální hodnoty parametrů **SSR modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **PO4**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	6,40E-05	2	-0,03	0,10	-48	1,94E-07	10	-2,33	0,29	-14
2	6,78E-04	2	0,10	2,33	-19	2,93E-03	2	0,16	3,53	-22
3	2,58E-04	2	-0,01	0,39	-28	1,00E-07	7	0,24	1,19	-14
4	1,48E-04	2	-0,07	0,26	-39	1,10E-07	9	0,94	0,38	-7
5	1,05E-03	2	0,06	0,36	-24	1,61E-03	6	0,86	0,12	-1
6	1,43E-04	2	-0,02	0,10	-45	1,08E-07	9	0,58	0,30	-23
7	1,14E-03	2	0,09	0,20	-14	3,96E-02	2	0,68	0,10	3
8	1,27E-04	2	-0,08	1,02	-25	7,36E-03	2	0,71	0,50	2
9	5,41E-06	3	0,07	0,26	-12	3,07E-07	6	0,22	1,13	-15
10	1,08E-04	2	-0,13	0,14	-49	1,00E-07	8	0,88	0,43	-22
11	1,38E-04	2	0,01	0,27	-33	1,02E-07	7	0,84	0,45	-13
12	9,71E-05	2	-0,02	0,05	-48	1,09E-07	9	0,44	0,41	-34
13	1,03E-04	2	-0,04	0,71	-47	1,00E-07	8	0,95	0,55	-9
14	1,06E-07	8	0,50	0,83	2	1,37E-02	10	-5,01	0,85	6
15	9,17E-06	3	0,11	0,28	-5	1,02E-07	9	0,75	0,47	-4
16	1,17E-04	4	0,41	1,10	8	7,75E-03	2	0,46	1,44	9
17	5,18E-04	2	0,21	0,62	-33	1,00E-07	8	0,86	0,26	-5
18	2,86E-07	10	0,46	0,07	-1	6,03E-06	7	0,32	0,21	-3
Průměr	2,61E-04	3	0,09	0,51	27*	4,05E-03	7	0,14	0,70	11*

	Segment S1					Segment S2				
	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	k_k (mm ^(1-nk) /min)	n_k (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
2014	1,00E-07	5	-0,09	1,15	61*	4,01E-03	2	0,30	1,65	35*
2015	9,10E-06	4	-0,99	2,95	205*	6,28E-06	7	0,65	1,85	30*
Celý soubor	4,87E-06	4	-0,47	2,22	134*	4,26E-03	2	0,33	1,80	36*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 14: Optimální hodnoty parametrů **IUH modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **PO5**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	0,7	2	-0,28	0,02	4	1,7	2	0,28	0,16	3
2	2,1	2	0,77	2,98	5	0,8	5	0,76	0,72	-1
3	1,0	2	-0,32	0,37	17	1,6	2	0,46	0,34	3
4	0,8	2	0,31	0,15	14	2,2	2	0,80	1,33	8
5	1,2	2	-0,29	0,31	16	3,2	2	0,16	0,45	8
6	0,7	2	-0,01	0,05	13	1,3	2	0,00	0,33	12
7	1,2	2	-0,06	0,32	24	4,2	2	0,42	0,50	9
8	1,2	2	-0,01	0,77	10	5,2	2	0,41	1,68	5
9	0,9	2	-0,17	0,67	41	1,7	2	0,12	0,67	11
10	0,7	2	0,25	0,02	1	1,5	2	0,48	0,76	16
11	0,9	2	0,02	0,26	15	1,7	2	0,30	1,24	11
12	0,6	2	-0,10	0,01	2	1,2	2	-0,35	0,22	6
13	0,9	2	0,34	0,14	2	2,2	2	0,48	0,96	3
14	3,2	2	0,21	2,37	9	1,5	6	0,46	0,91	4
15	1,1	2	-0,22	1,51	28	2,6	2	0,34	1,09	7
16	3,0	2	-0,39	2,40	15	6,2	2	-0,20	2,12	10
17	1,2	2	0,38	0,59	13	2,0	2	0,77	1,25	11
18	2,4	2	-0,53	0,90	9	2,3	2	-0,73	0,85	11
Průměr	1,3	2	0,00	0,77	13*	2,4	2	0,28	0,87	8*

	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
2014	1,8	2	-22,41	3,35	379*	2,9	2	-0,23	1,72	34*
2015	1,9	2	-36,36	4,43	496*	3,6	2	-0,48	3,01	45*
Celý soubor	1,8	2	-29,43	3,94	439*	3,1	2	-0,38	2,41	38*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 15: Optimální hodnoty parametrů **IUH modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **PO6**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	0,4	4	-0,28	0,02	4	0,8	4	0,24	0,17	3
2	0,9	4	0,76	2,99	5	0,6	6	0,75	0,72	-1
3	0,6	4	-0,32	0,37	17	0,6	5	0,42	0,35	3
4	0,5	4	0,31	0,15	14	0,9	4	0,79	1,34	8
5	0,6	5	-0,33	0,31	16	0,8	5	-0,50	0,47	8
6	0,5	4	-0,01	0,05	13	0,7	4	-0,01	0,33	12
7	0,7	4	-0,07	0,32	24	0,9	5	0,14	0,52	10
8	0,5	5	-0,02	0,77	10	1,3	4	0,16	1,72	6
9	0,5	4	-0,17	0,67	41	0,6	5	0,04	0,68	11
10	0,5	4	0,25	0,02	1	0,7	4	0,47	0,76	17
11	0,5	4	0,02	0,26	15	0,8	4	0,28	1,24	11
12	0,4	4	-0,10	0,01	2	0,7	4	-0,41	0,22	6
13	0,5	4	0,33	0,14	2	0,7	5	0,41	0,99	3
14	1,1	4	-0,01	2,39	9	1,7	5	0,46	0,91	4
15	0,6	4	-0,22	1,51	28	1,0	4	0,21	1,10	7
16	1,1	4	-0,60	2,41	15	14,4	5	0,13	1,88	10
17	0,6	4	0,37	0,59	13	0,7	5	0,77	1,26	11
18	1,0	4	-0,73	0,91	9	0,9	4	-0,87	0,86	11
Průměr	0,6	4	-0,05	0,77	13*	1,6	5	0,19	0,86	8*

	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
2014	0,8	4	-24,42	3,35	379*	1,0	4	-0,50	1,73	34*
2015	0,9	4	-40,27	4,43	496*	1,1	4	-1,10	3,02	45*
Celý soubor	0,8	4	-32,32	3,94	439*	1,1	4	-0,81	2,42	38*

*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 16: Optimální hodnoty parametrů **IUH modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **PO7**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	9,2	6	-0,40	0,03	4	22,7	5	-0,19	0,60	-3
2	117,0	5	-0,02	5,46	-21	12,0	5	-0,21	1,77	-2
3	131,8	5	-0,30	0,72	-14	70,6	5	-0,46	2,73	-20
4	105,2	5	-0,04	0,24	-13	37,9	5	0,05	1,72	-17
5	147,3	5	-0,14	0,72	-23	17,4	5	-0,33	1,07	-13
6	16,7	5	-0,17	0,05	10	41,7	5	-0,38	0,61	-5
7	57,0	5	-0,04	0,18	10	18,9	5	0,54	0,29	-2
8	190,3	5	-0,21	0,91	-5	35,5	5	0,43	0,94	-2
9	75,0	5	-0,25	0,64	35	25,1	5	-0,03	0,84	6
10	8,6	6	0,08	0,03	-1	2,5	10	0,57	0,67	14
11	72,5	5	0,09	0,09	2	47,9	5	0,44	0,65	-6
12	14,4	5	-0,16	0,01	0	21,9	5	-0,29	0,46	-4
13	6,9	6	-0,10	0,11	1	18,7	5	0,15	1,40	-5
14	30,0	5	-0,01	1,77	3	1,5	6	0,46	0,91	4
15	108,0	5	-0,38	1,16	17	27,3	5	0,22	0,71	3
16	41,2	5	0,07	1,94	10	8,3	10	0,12	1,84	9
17	53,3	5	0,05	0,42	0	3,1	10	0,16	1,10	9
18	15,3	5	0,26	0,73	7	47,5	5	-0,23	0,50	2
Průměr	66,6	5	-0,09	0,84	10*	25,6	6	0,06	1,05	7*

	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
2014	15,0	5	-6,91	6,32	263*	11,9	5	-0,33	2,39	50*
2015	15,0	5	-4,86	4,86	183*	15,0	5	-0,11	3,81	56*
Celý soubor	15,0	5	-5,57	5,51	218*	11,2	5	-0,26	3,12	56*

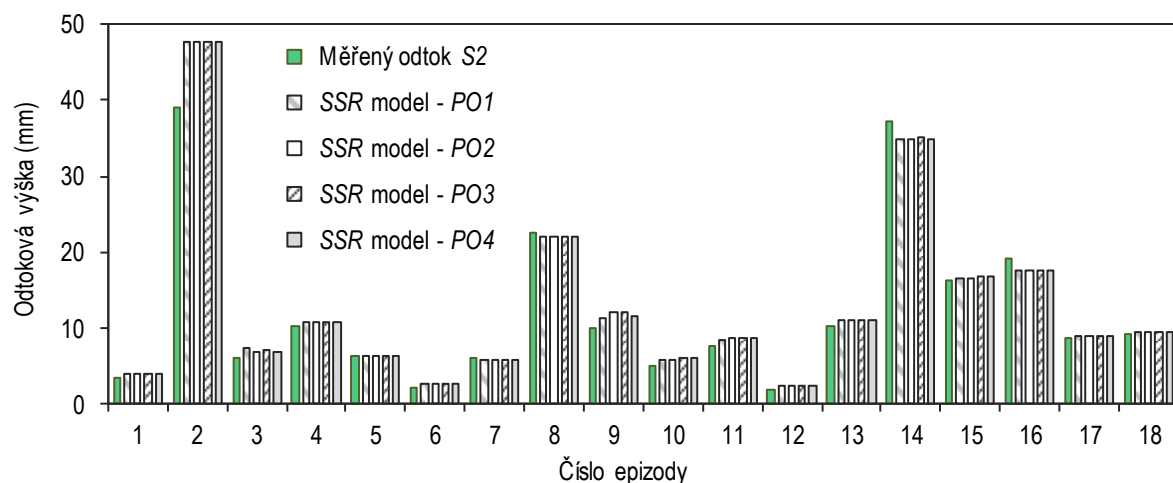
*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.

Tab. 17: Optimální hodnoty parametrů **IUH modelu** pro jednotlivé epizody (scénáře A, horní tabulka), vegetační sezóny (scénář B, dolní tabulka) a celý kalibrační soubor (scénář C, dolní tabulka) získané z **PO8**. Zobrazeny jsou ukazatele kvality shody modelu se skutečností *NSE*, *RMSE* a *VE*.

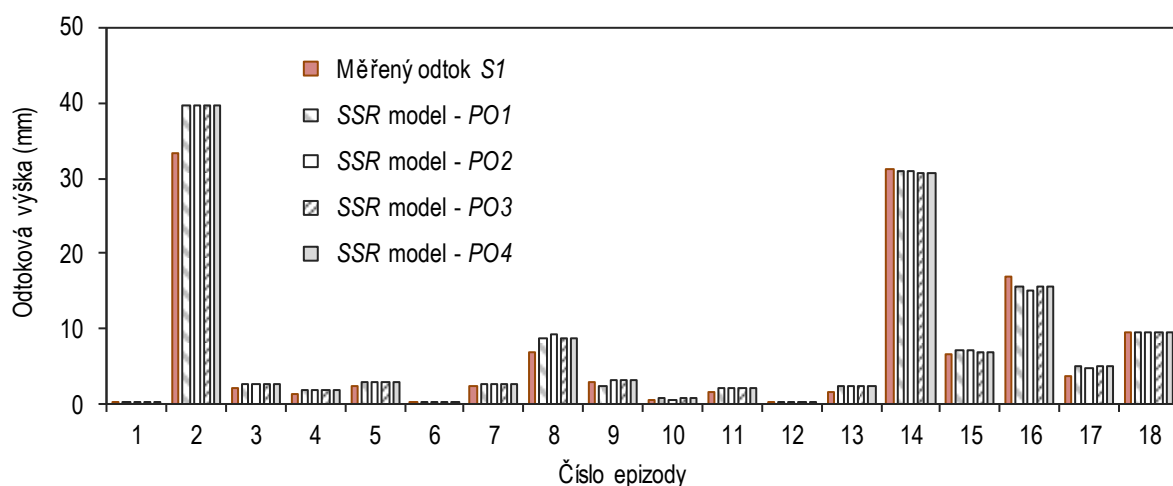
Číslo epizody	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
1	74,1	2	-0,15	0,02	4	22,7	5	-0,19	0,60	-3
2	85,2	7	-0,03	5,86	-23	12,0	5	-0,21	1,77	-2
3	86,0	7	-0,39	0,78	-14	70,6	5	-0,46	2,73	-20
4	65,8	7	-0,07	0,26	-14	37,9	5	0,05	1,72	-17
5	101,1	7	-0,19	0,78	-25	17,4	5	-0,33	1,07	-13
6	24,2	4	-0,16	0,05	10	41,7	5	-0,38	0,61	-5
7	38,7	7	-0,06	0,18	10	18,9	5	0,54	0,29	-2
8	128,6	7	-0,27	1,00	-5	35,5	5	0,43	0,94	-2
9	47,0	7	-0,29	0,64	35	25,1	5	-0,03	0,84	6
10	63,8	2	0,12	0,02	-1	2,5	10	0,57	0,67	14
11	45,7	7	0,07	0,09	1	47,9	5	0,44	0,65	-6
12	38,8	3	-0,06	0,01	0	21,9	5	-0,29	0,46	-4
13	12,3	4	0,02	0,11	1	18,7	5	0,15	1,40	-5
14	19,9	8	-0,13	1,77	2	1,5	6	0,46	0,91	4
15	71,9	7	-0,43	1,15	17	27,3	5	0,22	0,71	3
16	22,2	10	-0,03	1,91	10	8,3	10	0,12	1,84	9
17	36,0	7	0,01	0,45	2	3,1	10	0,16	1,10	9
18	8,0	10	0,19	0,71	7	47,5	5	-0,23	0,50	2
Průměr	53,9	6	-0,10	0,88	10*	25,6	6	0,06	1,05	7*

	Segment S1					Segment S2				
	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)	<i>k_{IUH}</i> (min)	<i>n_{IUH}</i> (–)	<i>NSE</i> (–)	<i>RMSE</i> (mm)	<i>VE</i> (%)
2014	92,2	7	-0,24	1,87	69*	39,3	7	-0,16	5,54	50*
2015	28,5	7	-1,36	3,55	118*	4,6	7	-0,48	3,21	56*
Celý soubor	50,0	7	-0,73	3,74	109*	39,3	7	-0,16	6,57	67*

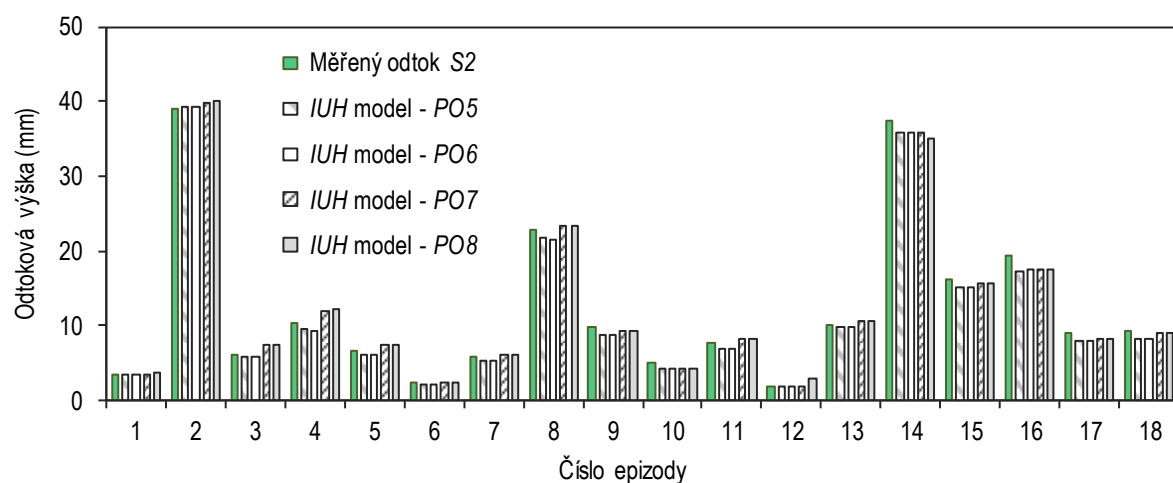
*Průměr je v případě *VE* vypočítán z absolutních hodnot.



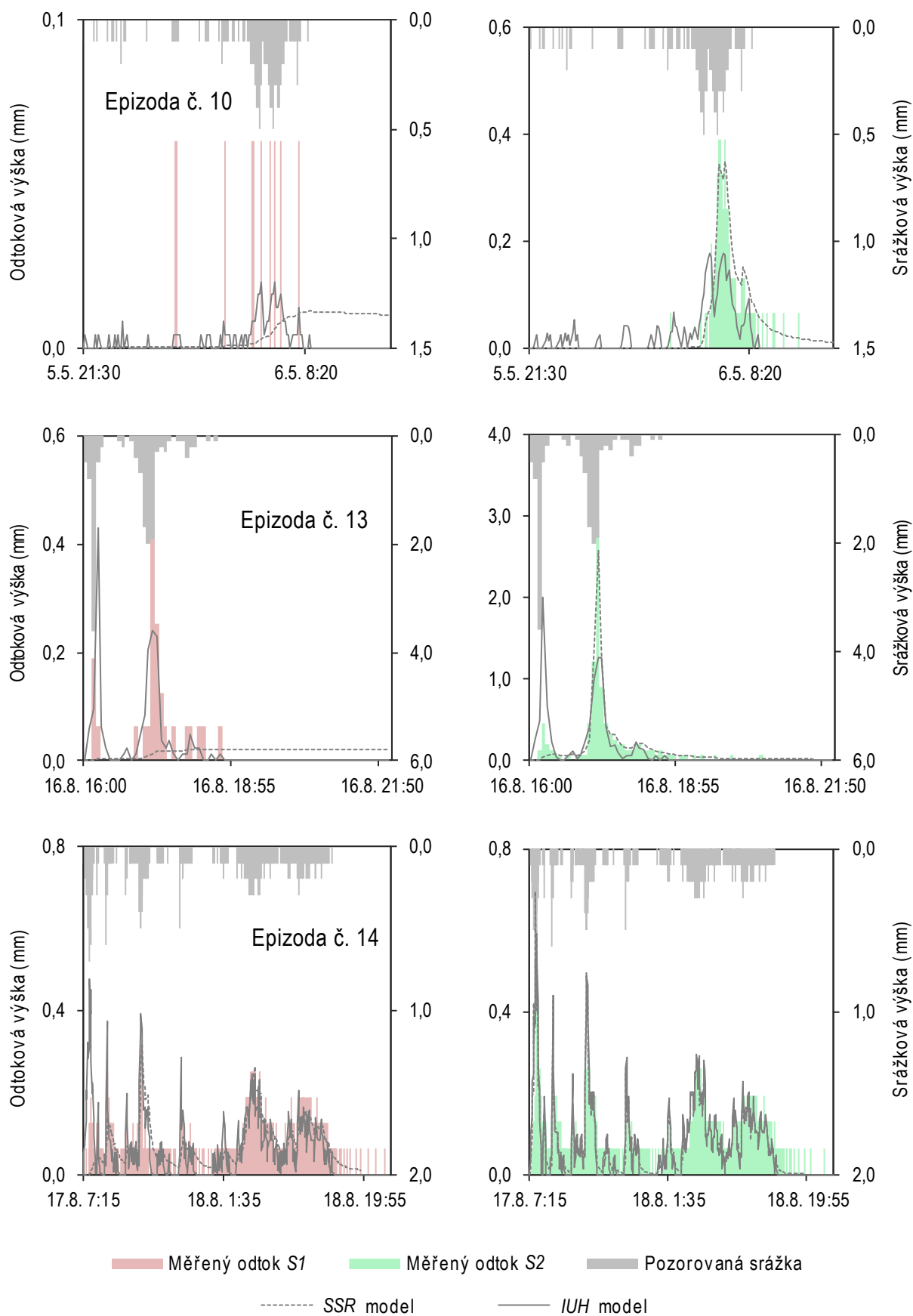
Obr. 13: Porovnání skutečných a vypočítaných odtokových výšek (s použitím PO1, PO2, PO3 a PO4) pro jednotlivé epizody SSR modelem. Odtok byl naměřen ze segmentu S2.



Obr. 14: Porovnání skutečných a vypočítaných odtokových výšek (s použitím PO1, PO2, PO3 a PO4) pro jednotlivé epizody SSR modelem. Odtok byl naměřen ze segmentu S1.



Obr. 15: Porovnání skutečných a vypočítaných odtokových výšek (s použitím PO5, PO6, PO7 a PO8) pro jednotlivé epizody IUH modelem. Odtok byl naměřen ze segmentu S2.



Obr. 16: Epizody č. 10, 13 a 14 s dostatečně přesně modelovaným odtokem dle průměru *NSE* obou modelů.